

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ЯКИМЧУК ВЛАДИСЛАВ МИКОЛАЙОВИЧ**

УДК 621.798.3:004.4 (043.3)

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**Структурно-параметричний синтез функціонально-мехатронних модулів  
робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів із харчовими  
продуктами**

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

  
Якимчук В.М.



Науковий керівник: Гавва Олександр Миколайович

Доктор технічних наук, професор

Київ 2023

## АНОТАЦІЯ

*Якимчук В. М.* Структурно-параметричний синтез функціонально-мехатронних модулів робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів із харчовими продуктами – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 “Галузеве машинобудування” – Національний університет харчових технологій Міністерства освіти і науки України, Київ, 2023.

Дисертація присвячена розробці методологічного підходу проектування робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів із харчовими продуктами, який базується на морфологічному аналізі і синтезі їх структури та багатокритеріальному синтезі їх функціонально-мехатронних модулів. У дослідженні проведено оцінку конкурентоспроможності типових зразків робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів із харчовими продуктами та їх функціональних модулів на основі вибіркового аналізу та синтезу допустимих варіантів компонувань.

На основі морфологічного аналізу виконано декомпозицію службової функції робототехнічних комплексів для формування транспортних пакетів із харчовими продуктами та виділено їх характерні функціонально-мехатронні модулі, побудовано ієрархічну структуру. Отримано масиви конструктивного виконання функціонально-мехатронних модулів: подачі одиничного тарного вантажу; горизонтального переміщення структурних елементів транспортного пакету; вертикального переміщення тарного вантажу або структурного елемента транспортного пакету; подачі одиничного піддону, які рекомендовано використовувати для створення параметричних рядів конструкцій, що виконують однотипну технологічну операцію.

На основі морфологічного синтезу встановлено вагомі параметри та критерії технічної ефективності як для робототехнічного комплексу загалом, так і для його функціонально-мехатронних модулів, а саме – максимальне навантаження; максимальна швидкість руху робочих органів; точність позиціонування робочих ланок; енерговитрати на виконання службової функції; можливість швидкого

переналаштування. За цими параметрами і критеріями виконано оцінку ефективності структури функціонально-мехатронних модулів горизонтального та вертикального переміщення тарного вантажу та отримано пошукову множину в межах аналізу чотирьох типів функціональних модулів для вертикального переміщення та в межах аналізу п'яти типів функціональних модулів для горизонтального переміщення.

Теоретично обґрунтовано раціональні рухи робочих органів робототехнічних комплексів при виконанні умови енергозбереження під час формування транспортного пакету. Встановлено, що різниця між споживанням енергії на формування транспортного пакету за типовою схемою та запропонованою схемою становить 140 %.

Запропоновано конструкцію функціонально-мехатронного модуля покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії для формування структурних елементів транспортного пакету. Встановлено залежність між масою структурних елементів транспортного пакету, рушійним зусиллям платформи мехатронного модуля покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом та значенням керуючого сигналу з метою забезпечення точності позиціонування платформи. Результатами експериментальних досліджень визначено, що запропонована схема керування функціонально-мехатронним модулем покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом заощаджує до 40 % енергії стисненого повітря в процесі формування транспортного пакету, яка може повторно використовуватися в повторних циклах технологічного процесу формування транспортного пакету.

Розроблено аналітичні залежності для визначення тривалості виконання технологічної операції переміщення тарного вантажу в горизонтальній площині за заданим законом руху та виконано оцінку раціональних параметрів функціонально-мехатронного модуля лінійного переміщення з електромеханічним приводом, що дало змогу зменшити сумарну потужність привода.

Запропоновано комплексний підхід для визначення мінімального та

максимального значень вакуума з умови безпечного утримання тарного вантажу вакуумним пристроєм захоплювання за трьома показниками експлуатаційних вимог під час виконання операції переміщення. Розроблено математичну модель для визначення енергетичних показників вакуумних генераторів з функцією енергозбереження.

Результати комплексних наукових досліджень є науковою основою для практичних рекомендацій по удосконаленню відомих та створенню інноваційних конструкцій мехатронних модулів, що виконують максимальну кількість корисних функцій та відповідають критеріям технічної ефективності: розроблено та запропоновано пілотні зразки нових функціонально-мехатронних модулів із пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії для вертикального переміщення тарних вантажів й для структурних елементів транспортного пакету та функціонально-мехатронного модуля із вакуумним захоплювальним пристроєм з функцією енергозбереження.

Результати досліджень впроваджено під час проектування нового пакувального обладнання та модернізації існуючого на ДП «Фесто», ТОВ «Інта», ТОВ «Завод пакувального обладнання «Термо-Пак» та в навчальний процес НУХТ.

**Ключові слова:** робототехнічний комплекс, тарний вантаж, транспортний пакет, функціонально-мехатронний модуль, харчові продукти, критерії технічної ефективності, навантаження, енергозбереження, моделювання, робочий орган, багатокритеріальний вибір, морфологічного аналіз та синтезу, структурно-параметричний синтез, частота, вакуумний генератор, корисна функція, електропневмомеханічний привод, кінематичні та силові параметри.

## ABSTRACT

*Yakymchuk V.* Structural and parametric synthesis of functional-mechatronic modules of robotic complexes for the formation of transport packages with food products – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the Doctor of Philosophy degree in specialty 133 "Industrial Mechanical Engineering" - National University of Food Technologies of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation is devoted to the development of a methodological approach to the design of robotic complexes for the formation of transport packages with food products, which is based on morphological analysis and synthesis of their structure and multi-criteria synthesis of their functional-mechatronic modules. The study evaluated the competitiveness of typical samples of robotic complexes for the formation of transport packages with food products and their functional modules on the basis of a selective analysis and synthesis of admissible layout options.

On the basis of morphological analysis, a decomposition of the service function of robotic complexes for the formation of transport packages with food products is carried out, their characteristic functional and mechatronic modules are allocated, a hierarchical structure is built. Arrays of structural design of functional-mechatronic modules have been obtained: supply of unit transport package; horizontal movement of structural elements of the transport package; vertical movement of tare package or structural element of a transport package; Single pallet feeds which are recommended to be used to create parametric series of structures that perform the same type of technological operation.

On the basis of morphological synthesis significant parameters and criteria of technical efficiency have been established both for the robotic complex as a whole and for its functional and mechatronic modules, namely, the maximum load; maximum speed of movement of working bodies; accuracy of positioning of working links; energy consumption for the performance of an official function; the ability to quickly reconfigure. According to these parameters and criteria, the efficiency of the structure of functional-mechatronic modules for horizontal and vertical movement of tare package was evaluated and a search set was obtained within the analysis of four types of functional modules for vertical movement and within the analysis of five types of functional modules for horizontal movement.

The rational movements of the working bodies of robotic complexes under the fulfillment of the energy saving condition during the formation of the transport package are theoretically substantiated. It is found that the difference between the energy consumption for the formation of a transport package according to the typical scheme and the proposed scheme is 140%.

The design of a functional-mechatronic module for step-by-step movement of the platform with a pneumatic drive and an energy recovery function for the formation of structural elements of a transport package is proposed. The relationship between the mass of the structural elements of the transport package, the driving force of the platform of the mechatronic module for step-by-step movement of the platform with a pneumatic drive has been established and the value of the control signal in order to ensure the accuracy of the platform positioning. The results of experimental studies have determined that the proposed control scheme of the functional-mechatronic module for step-by-step movement of the platform with a pneumatic drive saves up to 40 % of compressed air energy in the process of forming a transport package, which can be reused in repeated cycles of the technological process of forming a transport package.

Analytical dependencies have been developed to determine the duration of the technological operation of moving tare package in the horizontal plane according to the given law of motion and an assessment of the rational parameters of the functional-mechatronic module of linear displacement with an electromechanical drive has been carried out, which made it possible to reduce the total power of the drive.

An integrated approach is proposed to determine the minimum and maximum values of vacuum under the condition of safe holding of tare package by a vacuum gripping device according to three indicators of operational requirements during the transfer operation. A mathematical model has been developed to determine the energy performance of vacuum generators with energy saving function.

The results of comprehensive scientific research are the scientific basis for practical recommendations for improving the known and creating innovative designs of mechatronic modules that perform the maximum number of useful functions and meet the criteria of technical efficiency: pilot samples of new functional and mechatronic

modules with pneumatic drive and energy recovery function for vertical movement of tare package and for structural elements of the transport package and functional mechatronic module with vacuum gripping device with energy saving function.

The results of the research were implemented during the design of new packaging equipment and the modernization of existing ones at "Festo", LLC "Inta", LLC "Packaging Equipment Plant "Thermo-Pack" and in the educational process of NUFT.

**Keywords:** robotic complex, tare package, transport package, functional and mechatronic module, food products, criteria of technical efficiency, load, energy saving, modeling, working body, multi-criteria selection, morphological analysis and synthesis, structural-parametric synthesis, frequency, vacuum generator, useful function, electro-pneumatic-mechanical drive, kinematic and power parameters.

### Список праць, опублікованих за темою дисертації

#### *Статті в фахових виданнях:*

1. Рекуперация енергії в пневматичному приводі функціонального мехатронного модуля накопичення шарів вантажів /М.В. Якимчук, О.М. Гавва, Л.О. Кривопляс-Володіна, В.М. Якимчук. Наукові праці НУХТ. 2018. Том 24, № 6. С.119-130. DOI: 10.24263/2225-2924-2018-24-6-16.

[https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/28636/4/%d0%a2%d0%be%d0%bc24\\_%236%20%282%29.pdf](https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/28636/4/%d0%a2%d0%be%d0%bc24_%236%20%282%29.pdf)

*(Науковий журнал, входить до затвердженого МОН переліку фахових видань України з технічних наук, міжнародна індексація: Index Copernicus, EBSCOhost, Google Scholar ).*

2. Якимчук В.М., Гавва О.М. Ефективне використання енергетичного ресурсу в мехатронних модулях пакувальних машин. Наукові праці НУХТ. 2019. Том 25, № 5. С.55-63. DOI: 10.24263/2225-2924-2019-25-5-7.

[https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/30242/1/Tom\\_25\\_%e2%84%965.pdf](https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/30242/1/Tom_25_%e2%84%965.pdf)

*(Науковий журнал, входить до затвердженого МОН переліку фахових видань України з технічних наук, міжнародна індексація: Index Copernicus, EBSCOhost, Google Scholar).*

3. Дослідження впливу конструкцій захоплювальних пристроїв на динаміку роботи лінійних двигунів у мехатронних модулях переміщення упаковок /М.В. Якимчук, Л.О. Кривопляс-Володіна, С.М. Мироненко, В.М. Якимчук. Харчова промисловість. 2020. № 27. С. 114-125. DOI: 10.24263/2225-2916-2020-27-15. <https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/32230/1/Food%20Industry27.pdf>.

*(Науковий журнал, входить до затвердженого МОН переліку фахових видань України з технічних наук, міжнародна індексація: Index Copernicus, Google Scholar).*

4. Вплив інерційних і геометричних параметрів вакуумних захоплювальних пристроїв на допустиме зусилля утримання тарно-штучних вантажів /М.В. Якимчук, О.М. Гавва, Л.О. Кривопляс-Володіна, С.В. Токарчук, В.М. Якимчук. Наукові праці НУХТ. 2020. Т. 26, № 5. С. 65-74. DOI: 10.24263/2225-2924-2020-26-5-10.

<https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/32579/1/INFLUENCE%20OF%20INERTIAL%20AND%20GEOMETRICAL%20PARAMETERS%20OF%20VACUUM%20CAPTURING%20DEVICES%20ON%20PERMISABLE%20EFFORTS%20FOR%20MAINTENANCE%20OF%20CONTAINERIZED%20ARTIFICIAL%20CARGO.pdf>

*(Науковий журнал, входить до затвердженого МОН Переліку фахових видань України з технічних наук, міжнародна індексація: Index Copernicus, EBSCOhost, Google Scholar).*

#### **Статті в інших виданнях**

5. Промислові роботи в лініях пакування (перспективи використання) / М.В. Якимчук, О.М. Гавва, А.П. Беспалько, В.М. Якимчук. Упаковка. 2019. №2. С. 46-49. [https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/29511/1/Upakovka\\_2-2019-Promuslovi\\_roboty\\_%231.pdf](https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/29511/1/Upakovka_2-2019-Promuslovi_roboty_%231.pdf) *(Науковий журнал, видання України).*

6. Промислові роботи в лініях пакування (перспективи використання) Ч.2 /М.В. Якимчук, О.М. Гавва, А.П. Беспалько, В.М. Якимчук. Упаковка. 2019. № 3. С. 41-45. [https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/29510/1/Upakovka\\_3-2019-promuslovi\\_roboty\\_%232.pdf](https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/29510/1/Upakovka_3-2019-promuslovi_roboty_%232.pdf) (Науковий журнал, видання України).

7. Iakymchuk V., Gavva O. Structural and Parametric Synthesis of Functional Mechatronic Modules of Machines for Formation of Transportation Packages of Food Products. Proceedings of university of Ruse. 2019. Vol. 58, book 10.2. P. 98-101. <https://conf.uni-ruse.bg/bg/docs/cp19/10.2/10.2-18.pdf> (Науковий журнал, видання Болгарії).

8. Якимчук М.В., Гавва О.М., Якимчук В.М. Захоплювальні пристрої для пакувальної індустрії. Упаковка. 2020. № 4-5. С. 48-51. <http://upakjour.com.ua/арх%D1%96v/2020/4-5-2020/obladnannya/zahoplyuvaln%D1%96-pristro%D1%97-dlya-pakuvalno%D1%97-%D1%96ndustr%D1%96%D1%97> (Науковий журнал, видання України).

### **Тези доповідей та матеріали конференцій**

9. Новітні підходи до створення ефективного пакувального обладнання / О.М. Гавва, В.М. Якимчук, О.О. Кохан //«Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції - основні засади її конкурентоздатності»: VI Міжнародна спеціалізована науково-практична конференція, 2017 р. К.: НУХТ, 2017. С. 91-92. <https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/25901/1/material%20resurs2017.pdf>

10. Якимчук В.М., Гавва О.М. Особливості компоновання зон робочого сервісного простору робототехнічних комплексів пакування. Новітні технології пакування: матеріали доповідей XVII Науково-практичної конференції молодих вчених «Новітні технології пакування», 20 квітня 2018. С. 64-66. <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/27163/1/packaging.pdf>

11. Якимчук В., Гавва О. Дослідження компоновання зон робочого сервісного простору робототехнічного комплексу для пакування харчової продукції. Наукові

здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: матеріали 84-ї Міжнародної наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів, 23-24 квітня 2018. Ч.ІІ. С. 116-117.

<http://conferencenuft.ho.ua/Books%20of%20abstracts/2018/Part%202.pdf>

12. Якимчук В.М., Гавва О.М. Особливості компонування зон робочого сервісного простору робототехнічних комплексів пакування. Інновації молоді - машинобудуванню (Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка): матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів, 18-22.05.2018. НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». С. 1-3. <http://s-konf.mmi.kpi.ua/imm2018/paper/view/13172>

13. Якимчук В.М., Гавва О.М. Використання енергозберігаючих вантажних платформ в робототехнічних комплексах для пакування упаковок з харчовим продуктом. «Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентноздатності»: матеріали VII Міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції, Київ, 2018. С. 144-147. [https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/28329/1/Resource\\_2018.pdf](https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/28329/1/Resource_2018.pdf)

14. Якимчук М.В., Гавва О.М., Кривопляс-Володіна Л.О., Якимчук В.М. Рекуперація енергії в пневматичному приводі функціонального мехатронного модуля накопичення шарів вантажів. Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції: програма та тези матеріалів VII-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 6-7 листопада 2018 р., НУХТ, м. Київ. С. 34-36. <https://drive.google.com/file/d/1zd0KbltrHzKuUwPS7V-BuO4bSgb6CJJW/view>

15. Якимчук В.М., Гавва О.М. Розробка та дослідження енергетично-ефективного комплексу пакування упаковок для харчових продуктів. XIII Всеукраїнська студентська науково-практична конференція з проблем пакувальної індустрії «Золотий каштан», Київ, 2018, С. 19-21. <https://drive.google.com/file/d/1jrTwhB9WNWdLWHH8aLe7E1m6s2nl2S5r/view>

16. Якимчук В.М., Гавва О.М. Мінімізація витрат енергії при формуванні транспортного пакета промисловими робототехнічними комплексами. Новітні

технології пакування: матеріали доповідей XVIII Науково-практичної конференції молодих вчених, 12 квітня 2019. Київ. С. 66-70.  
<https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/29375/1/packing.pdf>

17. Якимчук В., Гавва О. Дослідження формування транспортного пакету промисловими робототехнічними комплексами. Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: матеріали 85-ї Міжнародної наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів, 11-12 квітня 2019. Ч.ІІ. Київ. С. 65.  
<http://conferencenuft.ho.ua/Books%20of%20abstracts/2019/Part%202.pdf>

18. Якимчук В.М., Гавва О.М. Управління мехатронними модулями пакувальних машин за критерієм ефективного використання енергетичних ресурсів. Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті євроінтеграції: тези матеріалів VIII Міжнародної науково-технічної конференції, 5-6 листопада 2019 р., м. К.: НУХТ, 2019. С. 23-24.  
[https://drive.google.com/file/d/1xJ0v1zGAU69WxJABcr3ERRVFz0L7h\\_7N/view](https://drive.google.com/file/d/1xJ0v1zGAU69WxJABcr3ERRVFz0L7h_7N/view)

19. Якимчук В.М., Гавва О.М. Управління мехатронними модулями пакувальних машин за критерієм ефективного використання енергетичного ресурсу. «Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності»: збірник праць VIII Міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції, Київ, 2019. С. 126-128. <https://drive.google.com/file/d/1e06WSdCwbSCQSo8dZPoIPpleW1i1k5d9/view>

20. Gavva O., Iakymchuk V. Structural and parametric synthesis of functional mechatronic modules of machines for formation of transportation packages of food products. «New industries, digital economy, society - projections of the future II»: 58th Annual Science Conference of Ruse University, 2019. P. 431 Silistra, Ruse, Razgrad.  
<https://conf.uni-ruse.bg/bg/docs/Booklet%20SC'19.pdf>

21. Якимчук В.М., Гавва О.М. Дослідження роботи лінійних електродвигунів в мехатронних модулях обладнання формування транспортних пакетів. Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: Матеріали 86 Міжнар. наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ,

2–3 квітня 2020 р., Частина 2. м. Київ, 2020. С. 36.

[https://drive.google.com/file/d/1wjvF6eGCYun9\\_vBDLEtpq1\\_rTqLEX411/view](https://drive.google.com/file/d/1wjvF6eGCYun9_vBDLEtpq1_rTqLEX411/view)

22. Гавва О.М., Кривопляс-Володіна Л.О., Якимчук В.М. Функціонально-орієнтоване проектування пакувальних машин із врахуванням їх життєвого циклу. Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності: Матеріали ІХ Міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції, 10 грудня 2020 р., Київ. НУХТ, 2020. С. 123-124.

<https://drive.google.com/file/d/1gwP12Yb9ZWdTvMuTdxV5AotHehlENJjc/view>

23. Якимчук В.М., Гавва О.М., Якимчук М.В. Динамічний синтез мехатронного модуля захоплення із вакуумними елементами для тарних вантажів. Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності: Матеріали ІХ Міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції, 10 грудня 2020 р., Київ. НУХТ, 2020. С. 129-132.

<https://drive.google.com/file/d/1gwP12Yb9ZWdTvMuTdxV5AotHehlENJjc/view>

24. Вплив інерційних і геометричних параметрів вакуумних захоплювальних пристроїв на допустиме зусилля утримання тарно-штучних вантажів /М.В. Якимчук, О.М. Гавва, Л.О. Кривопляс-Володіна, С.В. Токарчук, В.М. Якимчук. Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції: Програма та тези матеріалів ІХ-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 10-11 листопада 2020 р., К.: НУХТ, 2020 р. С. 53-54.

<https://drive.google.com/file/d/17Q3vnjSlpLXnF8jvF1Cf7dsZoN3fi5B0/view>

25. Якимчук В.М., Гавва О.М. Дослідження похибки позиціонування робочих органів функціональних модулів із пневматичним сервоприводом у пакетоформувальних машинах. Матеріали доповідей ХХ Науково-практичної конференції молодих вчених «Новітні технології пакування». (Додаток до журналу «Упаковка»). Київ, 2021. С. 25-29.

[https://issuu.com/upakjour/docs/new\\_packaging\\_technologies\\_2021](https://issuu.com/upakjour/docs/new_packaging_technologies_2021)

26. Якимчук М.В., Гавва О.М., Якимчук В.М. Особливості багатокритеріального структурно-параметричного оптимізаційного синтезу типових функціональних модулів машин формування збільшених вантажних

одиниць. X міжнародна науково-технічна конференція «Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції». 9-10 листопада. Київ, 2021. С. 67-68.

<https://drive.google.com/file/d/19UKlOwRCKdLnSAB-vq0YCt8IMP6wC9NK/view?usp=sharing>

27. Якимчук В.М., Гавва О.М. Моделювання пневматичної системи позиціонування сервоприводів в пакетоформувальних машинах. Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: Матеріали 87 Міжнар. наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 15–16 квітня 2021 р., Частина 2. м. Київ, 2021. С. 19.

<http://conferencenuft.ho.ua/Books%20of%20abstracts/2021/Part%202.pdf>

28. Якимчук В.М., Гавва О.М. Дослідження похибки позиціонування робочих органів функціональних модулів із пневматичним сервоприводом у пакетоформувальних машинах. Матеріали доповідей XX Науково-практичної конференції молодих вчених «Новітні технології пакування». (Додаток до журналу «Упаковка»). Київ, 2021. С. 25-29.

[https://issuu.com/upakjour/docs/new\\_packaging\\_technologies\\_2021](https://issuu.com/upakjour/docs/new_packaging_technologies_2021)

29. Якимчук В., Гавва О. Багатокритеріальний структурно-параметричний оптимізаційний синтез типових функціональних модулів в обладнанні для формування збільшених вантажних одиниць. Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: Матеріали 88 Міжнар. наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, квітень-травень 2022 р., Частина 2. м. Київ, 2022. С. 32

<http://conferencenuft.ho.ua/Books%20of%20abstracts/2022/Part%202.pdf>

30. Якимчук М.В., Гавва О.М., Якимчук В.М. Особливості функціонально орієнтованого проектування машин пакування харчових продуктів у контексті технологій замкненого циклу. Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті євроінтеграції: Програма та тези матеріалів XI Міжнародної науково-технічної конференції, 8 листопада 2022 р., К.: НУХТ, С.

339-340.

<https://drive.google.com/file/d/1pUGwMBTnkJW5BWpNIPnbcVFb3OStlh5I/view>

31. Якимчук В., Гавва О., Якимчук М. Дослідження піднімально-опускних механізмів пакетоформуєчих машин за критерієм мінімізації витрат енергії. Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: Матеріали 89 Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 3-7 квітня 2023 р. К.: НУХТ, 2023 р. Ч.2. С. 45-46.

[https://drive.google.com/file/d/1SAKWDXUxNBFheYE\\_epEgb8bJbpj9vJuO/view?pli=1](https://drive.google.com/file/d/1SAKWDXUxNBFheYE_epEgb8bJbpj9vJuO/view?pli=1)

### ***Патенти***

32. Патент на винахід UA 123968, МПК F15B 11/06 (2006.01). Мехатронний модуль покровоного накопичення шарів вантажів з рекуператором енергії / Якимчук В.М., Якимчук М.В. заявник Національний університет харчових технологій. – № а201906056; опубл. 30.06.2021, бюл. № 26/2021. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1602182/>

33. Патент України на корисну модель UA 120623, МПК (2006) B01L 9/00 B65D 35/02 (2006/01). Мехатронний захоплювальний пристрій для пляшок / Якимчук М.В., Іванова Л.І., Якимчук В.М. заявник Національний університет харчових технологій. – № u201705198 опубл. 10.11.2017, бюл. № 21/2017. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/751123/>

34. Патент України на корисну модель UA 117262, МПК F15B 11/06 (2006.01). Мехатронний модуль лінійного переміщення з функцією рекуперації енергії / Якимчук М.В., Іванова Л.І., Горчакова О.М., Якимчук В.М. заявник Національний університет харчових технологій. – № u201612907; опубл. 26.06.2017, бюл. № 12/2017. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/638362/>

35. Патент України на корисну модель UA 121552, МПК (2006) F15B 15/00 G05B 19/43 (2006.01). Неповноповоротний пневмодвигун з демпфером / Якимчук М.В., Іванова Л.І., Якимчук В.М., заявник Національний університет харчових технологій. – № u201705903; опубл. 11.12.2017, бюл. № 23/2017. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/741018/>

36. Патент України на винахід UA 119481. МПК (2006) B25J 15/00. Мехатронний захоплювальний пристрій для пляшок /Якимчук М.В., Іванова Л.І.; Якимчук В.М.; заявник та патентовласник Національний університет харчових технологій. – № а201705197; заявл. 29.05.2017; опубл. 25.06.2019, бюл. № 12/2019.

<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1365995/>

37. Патент України на корисну модель UA 139489, F15B 11/06 (2006.01). Мехатронний пневматичний модуль з синхронізацією лінійних переміщень штоків в протифазі та функцією рекуперації енергії / Якимчук В.М., Якимчук М.В. заявник Національний університет харчових технологій. – № u201906055; заявл. 31.05.2019; опубл. 10.01.2020, бюл. № 1/2020.

<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1400823/>

38. Патент України на корисну модель UA 139490, F15B 11/06 (2006.01). Мехатронний модуль покрокового накопичення шарів вантажів з рекуператором енергії / Якимчук В.М., Якимчук М.В. заявник Національний університет харчових технологій. – № u201906057; заявл. 31.05.2019; опубл. 10.01.2020, бюл. № 1/2020.

<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1400632/>

39. Патент на винахід UA 123561, МПК F15B 11/06 (2006.01), F15B 11/22 (2006.01). Мехатронний пневматичний модуль з синхронізацією лінійних переміщень штоків в протифазі та функцією рекуперації енергії / Якимчук В.М., Якимчук М.В. заявник Національний університет харчових технологій. – № а201906054; опубл. 21.04.2021, бюл. № 16/2021.

<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1589370/>

## Зміст

<b>ВСТУП</b> .....	20
<b>РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ СТАН МАШИН ТА РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПАКЕТІВ ІЗ ХАРЧОВИМИ ПРОДУКТАМИ</b>	
1.1 Індустріальні технології переробки тарних вантажів з харчовими продуктами .....	28
1.2 Принципові відмінності в структурі технічних засобів формування транспортних пакетів.....	31
1.2.1 Технології формування транспортних пакетів .....	31
1.2.2 Аналіз структурних схем і технічних характеристик роботизованих комплексів та їх функціональних модулів формування транспортних пакетів.....	35
1.3 Критичний аналіз наукових праць присвячених створенню машин і робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів.....	51
1.4 Висновки до розділу та постановка задач досліджень.....	54
<b>РОЗДІЛ 2. ПРОГРАМА, ПРЕДМЕТ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ</b>	
2.1 Програма, об'єкт та предмет досліджень.....	57
2.2 Досліджувані параметри та методи експериментальних досліджень.....	61
2.3 Експериментальна установка функціонально-мехатронного модуля покрокового переміщення платформи для формування структурних елементів транспортного пакету.....	62
2.4 Експериментальна установка функціонально-мехатронного модуля лінійного переміщення тарних вантажів з електромеханічним приводом.....	72
2.5 Експериментальна установка функціонально-мехатронного модуля вакуумного захоплюючого пристрою.....	77
Висновки до розділу II.....	82

### **РОЗДІЛ 3. МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО ПРОЄКТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-МЕХАТРОННИХ МОДУЛІВ РОБОТОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ФОРМУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПАКЕТІВ**

3.1 Основні методологічні засади проектування робототехнічних комплексів на основі функціонально-мехатронних модулів.....	84
3.2 Морфологічний аналіз структури роботизованих комплексів формування транспортних пакетів.....	89
3.3 Морфологічний аналіз структури мехатронних модулів для формування транспортних пакетів.....	96
3.3.1 Мехатронний модуль подачі одиничного тарного вантажу.....	96
3.3.2 Мехатронний модуль горизонтального переміщення тарного вантажу або структурного елемента транспортного пакету.....	97
3.3.3 Мехатронний модуль вертикального переміщення одиничного тарного вантажу.....	99
3.3.4 Мехатронний модуль подачі піддону.....	102
3.4 Морфологічний синтез структури роботизованих комплексів для формування транспортних пакетів з функціональних мехатронних модулів.....	105
3.4.1 Багатокретиріальний синтез структури спеціалізованих робототехнічних комплексів для формування транспортних пакетів.....	106
3.4.2 Багатокретиріальний синтез структури функціонально-мехатронних модулів для формування транспортних пакетів.....	112
Висновки до розділу III.....	126

### **РОЗДІЛ 4 ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ФУНКЦІОНАЛЬНО МЕХАТРОННИХ МОДУЛІВ РОБОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ФОРМУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПАКЕТІВ.**

4.1 Аналіз витрати енергії на формування транспортного пакету в робототехнічних комплексах.....	129
4.2 Параметричний синтез та розробка системи керування функціонально-мехатронним модулем із пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії для вертикального переміщення тарних вантажів.....	139

4.2.1 Функціонально-мехатронний модуль покрокового переміщення платформи формування структурних елементів транспортного пакету.....	139
4.2.1.1 Параметричний синтез функціонального мехатронного модуля покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії для формування структурних елементів транспортного пакету.....	143
4.2.1.2 Реалізація заданого закону руху платформи функціонально-мехатронного модуля формування структурних елементів транспортного пакету.....	149
4.2.1.3 Синтез системи керування функціональним мехатронним модулем покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом.....	156
4.2.2 Функціонально-мехатронний модуль із пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії для укладання тарних вантажів.....	161
4.2.2.1 Параметричний синтез функціонального мехатронного модуля з пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії для укладання тарного вантажу.....	161
4.2.2.2 Синтез системи керування функціональним мехатронним модулем з пневматичним приводом для укладання тарних вантажів.....	167
4.3 Параметричний синтез функціонально-мехатронного модуля з електромеханічним приводом для горизонтального переміщення тарного вантажу .....	173
4.4 Параметричний синтез та розробка системи керування функціонально-мехатронного модуля з вакуумним захоплювальним елементом та функцією енергозбереження для утримання тарного вантажу.....	180
4.4.1 Характерна конструктивна схема та принцип роботи функціонально-мехатронного модуля з вакуумним захоплювальним елементом та функцією енергозбереження для утримання тарного вантажу.....	181
4.4.2 Синтез системи керування функціонально-мехатронного модуля з вакуумним захоплювальним елементом для утримання тарного вантажу..	185
Висновки до розділу IV.....	192

## **РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОСНОВНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНО-МЕХАТРОННИХ МОДУЛІВ РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ ФОРМУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПАКЕТІВ ІЗ ХАРЧОВИМИ ПРОДУКТАМИ**

5.1 Дослідження функціонально-мехатронного модуля покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії для формування структурних елементів транспортного пакету.....	194
5.2 Дослідження функціонально-мехатронного модуля лінійного переміщення тарних вантажів з електромеханічним приводом.....	205
5.3 Дослідження функціонально-мехатронного модуля із вакуумним захоплюючим пристрем для утримання тарного вантажу.....	209
5.3.1 Визначення зусилля утримання тарних вантажів пакованих в різні маркикартону.....	209
5.3.2 Дослідження зусилля зчеплення тарного вантажу з вакуумним присмоктувачем.....	214
Висновки до розділу V.....	215
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>218</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>221</b>
<b>ДОДАТОК А.....</b>	<b>237</b>
<b>ДОДАТОК Б.....</b>	<b>239</b>
<b>ДОДАТОК В.....</b>	<b>242</b>
<b>ДОДАТОК Г.....</b>	<b>244</b>
<b>ДОДАТОК Д.....</b>	<b>246</b>
<b>ДОДАТОК Е.....</b>	<b>253</b>

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Враховуючи величезні обсяги пакувальних перевезень харчових продуктів пакованих в транспортну тару, які щорічно досягають сотень мільярдів тон, актуальним завданням є автоматизація процесу формування збільшених вантажних одиниць. Перші наукові роботи по дослідженню конструкцій пакетоформувальних машин та розробленню методик їх розрахунку були виконані в ХХ столітті такими вченими як: Рідель Е.І. Кривопляс О.П. , Гавва О.М., Кукібний А.А., Єгоров В.Т., Буров А.А., Меньшенін А.І., Вацура А.М., Шкурін В.А, Щеглов В.Ф. та іншими. Значна кількість методик цих наукових робіт присвячена способам формування транспортних пакетів, методикам розрахунку функціональних пристроїв та механізмів. Поряд з цим методики проектування цього типу пакувальних машин потребують подальшого удосконалення у зв'язку з активним розвитком новітніх технологій приводів, систем їх керування та зворотних зв'язків. Обладнання для формування транспортних пакетів сьогодення – це робототехнічні комплекси, проектування яких базується на концепції мехатронно-модульної компоновки. Однак використання в таких робототехнічних комплексах типових конструкцій маніпуляторів з великою кількістю функціональних можливостей, які не задіяні для технологічного процесу є недоречним тому що, суттєво збільшує їх собівартість. На основі аналізу НРТС робіт з харчовими продуктами встановлено нагальну потребу в проектуванні нових зразків спеціалізованих робототехнічних пакетоформувальних комплексів на основі модульного принципу проектування та мехатронних систем керування з максимальним набором функціональних можливостей для формування транспортного пакету у відповідності до вимог виробника та за короткий час. Мінімізація термінів проектування спеціалізованих робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів із харчовими продуктами є актуальною і важливою науково-прикладною задачею для пакувального машинобудування. Для її вирішення пропонується поглибити існуючі та розробити нові методи виконання структурно-параметричного синтезу компонувань функціонально-мехатронних модулів формування транспортних пакетів за заданими характеристиками.

Результатом оцінки конкурентоспроможності отриманих зразків робототехнічних комплексів є визначення критеріїв ефективності для проведення вибіркового аналізу та синтезу допустимих варіантів компонувань функціонально-мехатронних модулів із визначеного параметричного ряду та визначення кращого варіанту.

Дисертаційна робота спрямована на вирішення актуальної науково - прикладної задачі – розробка методології проектування спеціалізованих роботизованих комплексів формування збільшених вантажних одиниць харчових продуктів, в основу якої покладено використання функціонально-мехатронних модулів

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до основних напрямів науково-інноваційної діяльності України, відповідно до закону «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» із змінами, внесеними згідно із Законом № 848-VIII (від 26.11.2015, ВВР, 2016, № 3, ст.25), пріоритетного напрямку наукових робіт Національного університету харчових технологій «Розроблення наукових основ технологічних процесів харчових, мікробіологічних і фармацевтичних виробництв із метою створення високоефективних технологій та обладнання, засобів механізації та автоматизації»; в межах кафедральної теми науково-дослідної роботи «Науково-технічні засади створення енергоощадних та ресурсозберігаючих процесів і обладнання харчових, фармацевтичних й поліграфічно-пакувальних виробництв», номер державної реєстрації 0121U100057»; держбюджетних тематик проблемної науково-дослідної лабораторії НУХТ: «Науково-технічні засади створення енергоефективних, багатофункціональних пакувальних машин харчових продуктів на основі неоднорідної системи мехатронних модулів» (замовник дослідження – МОН України, державний реєстраційний номер 0117U001249, автор – виконавець теми, роки виконання: 2017 - 2019); «Науково-технічні засади функціонально орієнтованого проектування машин пакування харчових продуктів у контексті технологій замкненого циклу» (замовник дослідження – МОН України, державний реєстраційний номер 0120U102557, автор – виконавець теми, роки виконання: 2020 – 2022).

**Мета і завдання досліджень.** Метою досліджень дисертаційної роботи є розробка методологічного підходу до проєктування спеціалізованих робототехнічних комплексів формування збільшених вантажних одиниць харчових продуктів із функціонально-мехатронних модулів, що виконують максимальну кількість корисних функцій та відповідають максимальним значенням критерію енергоефективності

Для досягнення визначеної мети поставлені наступні завдання:

– проаналізувати сучасний науково-технічний стан машин та робототехнічних комплексів для формування транспортних пакетів із харчовими продуктами відповідно до їх структури, мобільності, енерговитрат, продуктивності та точності позиціонування;

– розробити структуру методологічного підходу до проєктування функціонально-мехатронних модулів робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів із харчовими продуктами;

– виконати декомпозицію службової функції, морфологічний аналіз та синтез структури типових мехатронних модулів робототехнічних комплексів формування структурних елементів транспортного пакету з метою створення нових конструкцій, що виконують максимальну кількість корисних функцій та відповідають максимальним значенням критеріїв технічної ефективності.

– розробити та провести багатопараметричний синтез запропонованих конструкцій функціонально-мехатронних модулів з пневматичним та електромеханічним приводами з метою реалізації функцій рекуперації енергії;

– провести експериментальні дослідження на розроблених функціонально-мехатронних модулях роботизованих комплексів формування транспортних пакетів із харчовими продуктами для встановлення адекватності одержаних теоретичних результатів.

**Об'єкт дослідження** - функціональні зв'язки між структурою, кінематичними, силовими і енергетичними параметрами функціонально-мехатронних модулів робототехнічних комплексів формування збільшених вантажних одиниць із харчовими продуктами.

**Предметом дослідження** - функціонально-мехатронні модулі робототехнічних комплексів формування збільшених вантажних одиниць із харчовими продуктами.

**Методи досліджень** - теоретичні дослідження проводились комплексними методами із врахуванням мехатронно-модульної побудови робототехнічної машини. Для аналізу кінематичних та динамічних параметрів мехатронних модулів формування структурних елементів транспортного пакету з пневматичним приводом використано основні закони механіки, теорії термо- та газодинаміки для силових пневматичних приводів. Для теоретичного дослідження динаміки мехатронних модулів з позиційним електромеханічним приводом використовувались методи теорії автоматичного керування, які базуються на аналізі розв'язків лінеаризованої системи рівнянь. Експериментальні дослідження мехатронних модулів проведено з використанням теорії планування експерименту та статистики, методології активного експерименту, а їх результати в режимі реального часу отримано за допомогою датчиків тиску, переміщення та витрат, блоку аналогово-цифрового перетворювачів, комп'ютера та програмних пакетів: Labview, FluidLab\_PA, CoDeSys. Оброблення експериментальних даних та розрахунки виконані в програмних пакетах Microsoft Excel, MathCad та SolidWorks.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в розробці методологічного підходу до проектування робототехнічних комплексів формування збільшених вантажних одиниць із харчовими продуктами на основі функціонально-мехатронних модулів, що виконують максимальну кількість корисних функцій та відповідають регламентованим значенням критеріїв технічної ефективності.

*Вперше:*

- на основі морфологічного аналізу виконано декомпозицію службової функції робототехнічних комплексів для формування транспортних пакетів із харчовими продуктами та виділено їх характерні функціонально-мехатронні модулі, побудовано ієрархічну структуру;

- на основі морфологічного синтезу встановлено вагомі критерії технічної ефективності як для робототехнічного комплексу, так і для його функціональних модулів та за цими критеріями встановлено раціональні їх структури;

- теоретично обґрунтовано раціональні рухи робочих органів робототехнічних комплексів при виконанні умови енергозбереження;

- встановлено функціональну залежність коефіцієнта рекуперації енергії стисненого повітря в запропонованій конструкції функціонально-мехатронного модуля покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом та координати зупинки платформи;

- встановлено функціональну залежність між масою структурних елементів транспортного пакету, рушійним зусиллям руху платформи мехатронного модуля покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом та значенням вхідного керуючого сигналу.

*Отримали подальший розвиток :*

- виконано оцінку ефективності структури функціонально-мехатронних модулів робототехнічних комплексів формування транспортного пакету шляхом проведення аналізу та синтезу допустимих варіантів їх компонувань із створених параметричних рядів;

- розроблено алгоритм визначення зусилля утримання та зчеплення тарних вантажів вакуумним присмоктувачем за комплексним показником із врахуванням експлуатаційних вимог до вакуумних генераторів з функцією енергозбереження;

- на основі розроблених аналітичних залежностей для визначення тривалості виконання технологічної операції переміщення тарного вантажу виконано оцінку раціональних параметрів функціонально-мехатронних модулів лінійного переміщення з електромеханічним приводом.

**Практичне значення отриманих результатів.** Результати комплексних наукових досліджень стали науковою основою для практичних рекомендацій по удосконаленню відомих та створенню інноваційних конструкцій мехатронних модулів, що виконують максимальну кількість корисних функцій та відповідають критеріям технічної ефективності для робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів із харчовими продуктами:

- на базі результатів теоретичних та експериментальних досліджень розроблено та запропоновано пілотні зразки нових функціонально - мехатронних

модулів із пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії для вертикального переміщення тарних вантажів й для структурних елементів транспортного пакету та функціонально-мехатронного модуля вакуумного захоплюючого пристрою з функцією енергозбереження;

– проведені експериментальні дослідження режимів роботи запропонованих мехатронних модулів показали розширення їх функціональних можливостей щодо рекуперації енергії стисненого повітря, швидку зміну та контроль кінематичних та динамічних параметрів роботи. Технічні рішення захищені патентами України на корисні моделі № 139490, 139489, 121552 і 120623 та винаходи № 123561, 119481 і 123968.

– розроблено методики розрахунку раціональних кінематичних та силових параметрів мехатронних модулів лінійного переміщення та захоплюючих пристроїв за умови максимальної енергоефективності виконання технологічних операцій формування транспортного пакету. Технічні рішення захищені патентами України на корисні моделі № 117262 та на винахід 123968;

– результати досліджень впроваджено під час проектування нового пакувального обладнання та модернізації існуючого на таких підприємствах: ДП «Фесто», ТОВ «НВО Інта», ОВ «Завод пакувального обладнання «Термо-Пак» з економічним ефектом 1 311 141 грн;

– результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі кафедр машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв, мехатроніки та пакувальної техніки НУХТ.

**Особистий внесок здобувача.** Особистий внесок здобувача полягає в аналізі і узагальненні наукової літератури, розробленні методологічного підходу до проектування функціонально-мехатронних модулів робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів із харчовими продуктами, що виконують максимальну кількість корисних функцій та відповідають критеріям енергоефективності; створенні пілотних зразків нових функціонально - мехатронних модулів із пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії для вертикального переміщення тарних вантажів та структурних елементів

транспортного пакету; проведенні експериментальних досліджень режимів роботи таких мехатронних модулів; обробці і аналізі результатів аналітичних та експериментальних досліджень; формулюванні висновків, розробці матеріалів для отримання патентів. Основні результати аналітичних та експериментальних досліджень, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Постановка завдань досліджень, обговорення результатів виконано разом з науковим керівником д.т.н., проф. Гаввою О.М.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися й схвалені на наукових конференціях: VI-IX Міжнародній спеціалізованій науково-практичній конференції «Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції - основні засади її конкурентоздатності» (Київ, 2017-2020); XVII - XVIII Науково-практичні конференції молодих вчених «Новітні технології пакування» (Київ 2018-2019); Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді - машинобудуванню (Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка)» (Київ, 2018); XIII Всеукраїнській студентській науково-практичній конференції з проблем пакувальної індустрії «Золотий каштан» (Київ, 2018); «Biotechnologies and food technologies» (Ruse, 2019); 10-й Міжнародній спеціалізованій науково-практичній конференції «Тренди Lean-виробництва та пакування харчової продукції» (Київ, 2021); VI-X Міжнародних науково-технічних конференціях «Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції» (Київ, 2018-2022); 84-89 Міжнародних наукових конференціях молодих вчених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті» (Київ 2018-2023).

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 39 публікацій: 4 – у наукових фахових виданнях України, 3 – у інших виданнях України, 1 – у закордонному виданні; 23 тези доповідей у збірниках матеріалів конференцій; отримано 8 патентів, із них 3 на винахід та 5 на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків. Основний зміст дисертації викладено на 201 сторінці (з урахуванням таблиць та рисунків). Повний список використаних літературних джерел містить 161 найменування.

## **РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ СТАН МАШИН ТА РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ТРАНСПОРНИХ ПАКЕТІВ ІЗ ХАРЧОВИМИ ПРОДУКТАМИ**

### **1.1. Індустріальні технології переробки тарних вантажів із харчовими продуктами.**

Під терміном «індустріальні технології переробки тарних вантажів з харчовими продуктами» розуміють машинне оброблення тарних вантажів [1]. Система державної стандартизації упаковки в Україні забезпечує уніфікацію всієї пакованої продукції щодо вимог матеріалів упаковок, їх транспортування та зберігання.

З метою перевезення, складування і зберігання тарних вантажів із харчовими продуктами їх укрупнюють шляхом об'єднання. Об'єднаний структурний елемент з декількох тарних вантажів за визначенням є транспортним пакетом. Транспортний пакет [2] – це збільшене вантажне місце, сформоване з кількох окремих місць у тарі, скріплених між собою за допомогою універсальних чи спеціальних, разового або багаторазового користування пакетувальних засобів, на піддонах або без них, яке в процесі транспортування та зберігання забезпечує: можливість механізованого навантаження (вивантаження); цілісність пакетів; цілісність вантажів; безпеку працівників, що виконують транспортні, складські та вантажні роботи; безпеку руху поїздів.

Індустріальні технології переробки тарних вантажів з харчовими продуктами забезпечують пакувальні машини з горизонтальним та вертикальним способом формування транспортного пакету. До такого типу обладнання відносять транспортуючі машини, ПФМ та робототехнічні комплекси тощо. В залежності від виду і типу тарного вантажу з харчовим продуктом машини для формування транспортного пакету дуже різноманітні за кінематичними схемами та конструкційним виконанням (рис. 1.1).

Вибір типу машини для створення транспортного пакету залежить від вимог користувачів щодо її мобільності, ступеня автоматизації, універсальності, можливості швидкого переналадження тощо. До особливих вимог можна

віднести наявність засобів пакування та їх вид: на піддоні певного типу, без піддона, на прокладках та спосіб скріплення транспортного пакету.

Загалом можна зробити висновок, що типові конструкції засобів для індустріальної технології переробки тарних вантажів з харчовим продуктом та їх робочих органів визначаються технологічними вимогами пакування: геометричними розмірами тарного вантажу; фізико-хімічними властивостями харчової продукції, структурою і схемою формування транспортного пакету та його габаритними розмірами; продуктивністю; видом та типом допоміжних засобів пакування.

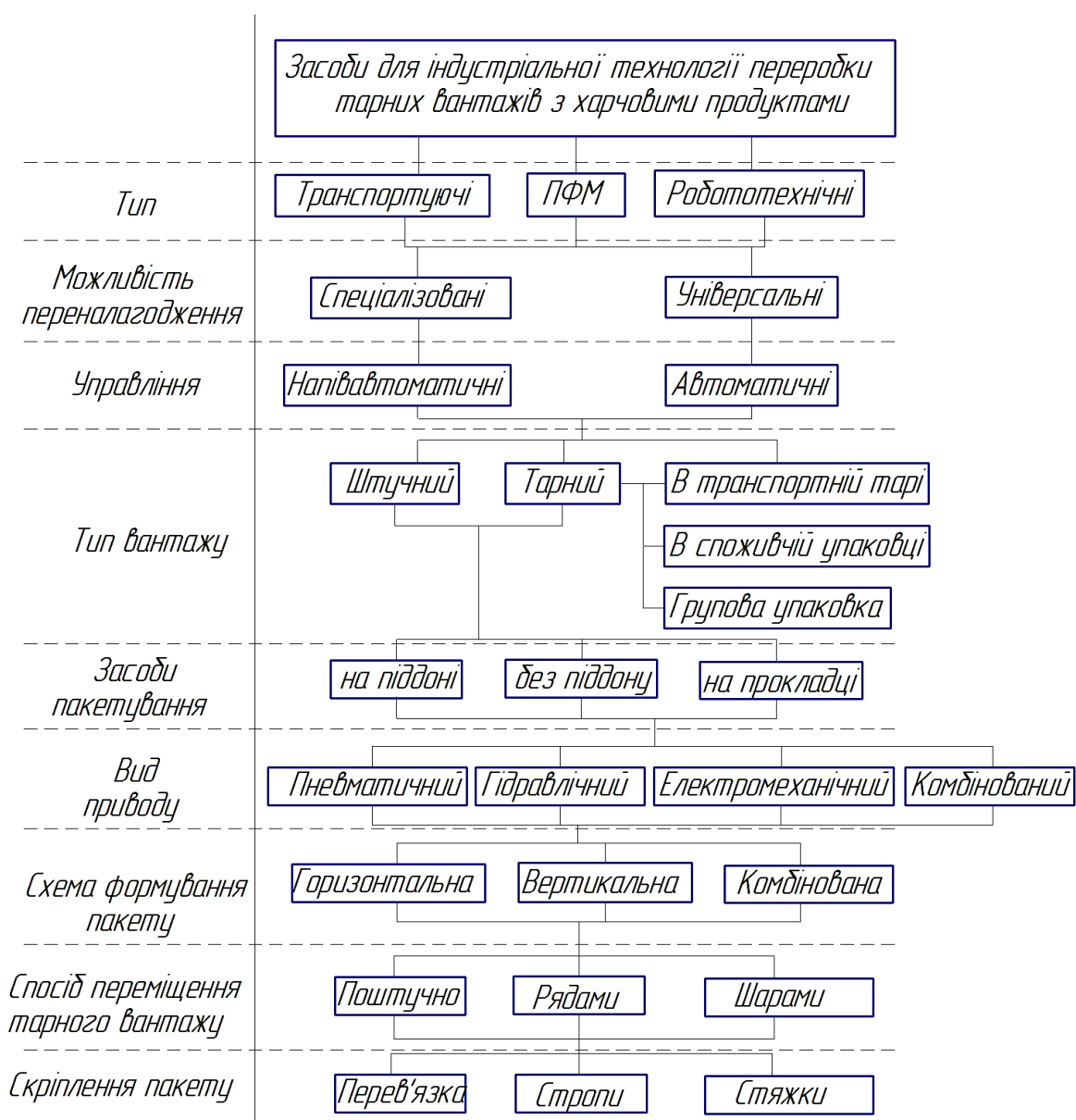


Рис.1.1 Класифікація засобів для індустріальної технології переробки тарних вантажів з харчовими продуктами

Транспортуючі машини (рис. 1.1) для формування транспортного пакету є вузькоспеціалізованими засобами та мають напівавтоматичне управління, що звужує їх технологічні можливості і як наслідок є мало використовуваними.

В конструкціях ПФМ різних типів і класів є багато спільного. Вони характеризуються відносно жорсткими циклами технологічного процесу пакетування однак мають можливість до переналагодження на рівні електронного керування за умови часткової заміни виконавчих пристроїв та механічного переналагодження конструкцій робочих органів. Кількість модулів, які переналагоджуються, та їх функціональне призначення залежить від способу формування транспортного пакету. Так, при формуванні транспортного пакету горизонтальним способом переналагодження потребують модулі зіштовхування та орієнтування, а при формуванні вертикальним способом – модулі піднімання/опускання структурних одиниць транспортного пакету.

Великі значення показника універсальності мають робототехнічні комплекси, в яких переналагодженням забезпечується лише на рівні програмного забезпечення у вигляді зміни програми для мікропроцесорної системи керування. До типових засобів в таких комплексах відносяться порталні роботи та роботи-маніпулятори.

Конструктивний аналіз засобів для індустриальної технології переробки тарних вантажів з харчовим продуктом в Україні показав, що біля 92% складають пакетоформуючі та робототехнічні машини [3]. При цьому спостерігається тенденція стрімкого зростання попиту на новітні робототехнічні комплекси для формування транспортних пакетів із харчовими продуктами. Біля 70% усіх харчових продуктів пакуються в жорстку та напівжорстку тару [1,2], що дозволяє в подальшому розглядати технологічні процеси та пакетоформувальне обладнання лише з цим типом тари.

Також можна стверджувати, що основними тенденціями подальшого розвитку машин для формування транспортного пакету є: удосконалення схем формоутворення, яке передбачає подальший перехід від простих схем до складних з використанням додаткових елементів кріплення; зменшення собівартості формування транспортного пакету шляхом створення нових, робототехнічних

конструкцій пакетоформуючих машин; створення новітніх засобів пакування, які в подальшому легко утилізуються.

## **1.2. Принципові відмінності в структурі технічних засобів формування транспортних пакетів.**

### ***1.2.1 Технології формування транспортних пакетів***

Процес формування транспортних пакетів складається з трьох основних технологічних стадій [1–16]: підготовки тарних вантажів до пакування, вкладання їх за певною схемою в пакет і скріплення пакета. Способи виконання цих стадій залежать від мобільності обладнання щодо типорозмірів тарних вантажів, засобів пакування (на піддон, палету, лоток, прокладку або в тару тощо), структурних схем формування транспортного пакета та його габаритних розмірів; продуктивності пакетоформувальних машин; конструктивних параметрів допоміжних засобів пакування та ін. Схеми формування транспортного пакету визначають з умови техніко-економічної ефективності. Наприклад, обираючи схему формування транспортного пакету на піддонах, слід передбачити, що при цьому разом з основними операціями і пристроями для формування структурних елементів транспортного пакета необхідно забезпечити додаткові операції та пристрої для їх виконання, а саме наявність магазину порожніх піддонів, їх подачу в зону формування тощо. Натомість в схемі формування транспортних пакетів без піддонів додаткові операції відсутні, однак при цьому технологічні операції формування транспортного пакету потребують перев'язки стиків вантажів у шарах.

Слід зазначити, що в сучасних технологічних схемах формування транспортних пакетів все більше передбачається виконання операцій їх скріплення, які виконуються спеціальним обладнанням.

Розрізняють три схеми формування транспортних пакетів залежно від способу переміщення тарних вантажів у просторі: горизонтальна, вертикальна та комбінована. Кожна схема виконується у декілька етапів [2, 7–16], які передбачають створення проміжних структурних елементів транспортного пакету. Типовий процес формування транспортного пакету з тарних вантажів форми паралелепіпеда (рис. 1.2) забезпечується ланцюжком технологічних операцій для

формування проміжних структурних елементів: 1 – одиничний тарний вантаж ; 2 – ряд (стопа); 3 – шар; 4 – штабель; 5 – транспортний пакет.

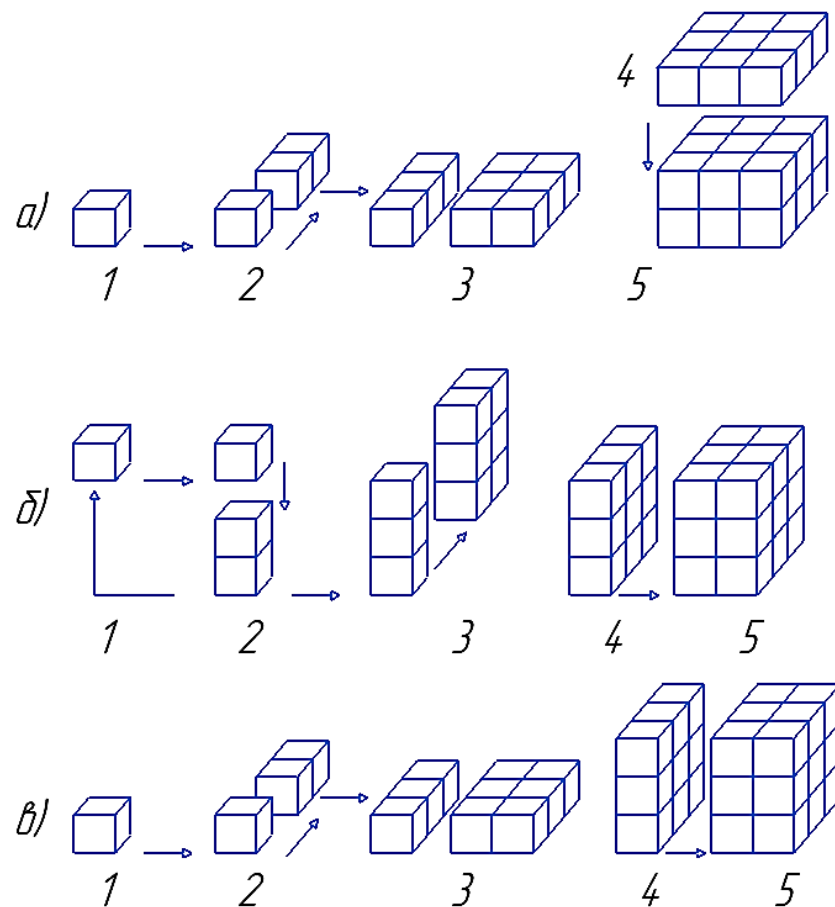


Рис. 1.2 Способи формування транспортних пакетів з тарних вантажів форми паралелепіпеда

Принцип горизонтального формування (рис. 1.2,а) полягає в послідовному формуванні ряду (2) із тарних вантажів (1) (рис. 1.2, а), на конвеєрі подачі горизонтальне їх переміщення на приймальний стіл для формування шару (3). Сформований шар (4) укладається на піддон, або на інший попередньо утворений, тим самим формується транспортний пакет (5). Укладання шарів може відбуватися трьома способами: перший - рухомим приймальним столом, який опускається у вертикальній площині; другий - рухомою площиною на якій формується шар і яка переміщується у вертикальній площині; третій - робототехнічним засобом на нерухомий піддон.

Принцип вертикального формування транспортного пакету (рис. 1.2,б) полягає в послідовному формуванні стопи (2) із тарних вантажів (1) та горизонтального її

переміщення на приймальний стіл для формування штабелю (3). Сформований штабель (4) переміщується горизонтально та формує транспортний пакет (5).

Принцип комбінованого формування транспортного пакету (рис. 1.2,в) полягає в послідовному формуванні ряду споживчих упаковок (2) з тарних вантажів (1), горизонтальне їх переміщення на приймальний стіл для формування шару (3). Сформований шар повертається кантувальним пристроєм, утворюючи штабель (4). Сформований штабель переміщується горизонтально та формує транспортний пакет (5).

В особливу групу можна виділити ПФМ, які характеризуються багатофункціональністю технологічних операцій. Це роботизовані комплекси формування транспортних пакетів [17 – 34].

Габаритні розміри і маса транспортних пакетів залежать від характеристики тарних вантажів та матеріалів пакованих харчових продуктів, способів їх перевезення та перевантаження, складування, умов зберігання тощо.

Одним із основних критеріїв до формування транспортних пакетів є повне використання корисної площі піддону; стійкість пакетів під час транспортування; зручність виконання НРТС робіт на піддонах або без них; наявність засобів скріплення або без них. Одним із традиційних засобів підвищення стійкості транспортного пакету для надійного його транспортування є перев'язка стиків вантажів у шарах.

Розроблений структурний граф технологічного процесу формування транспортного пакету наведено на рис. 1.3 та охоплює всі можливі способи формування транспортних пакетів із найрізноманітніших тарних вантажів.

На основі аналізу структурного графу технологічного процесу було встановлено типову послідовність операцій формування транспортного пакету, що є близькою до універсальної за показником виконання найменшої кількості операцій [1, 2, 8, 10] (показник працездатності машини).

**1.1 – 2.1 – 4.1 – 6.1 – 8.1 – 9.1 (10.1) – 15.1.**

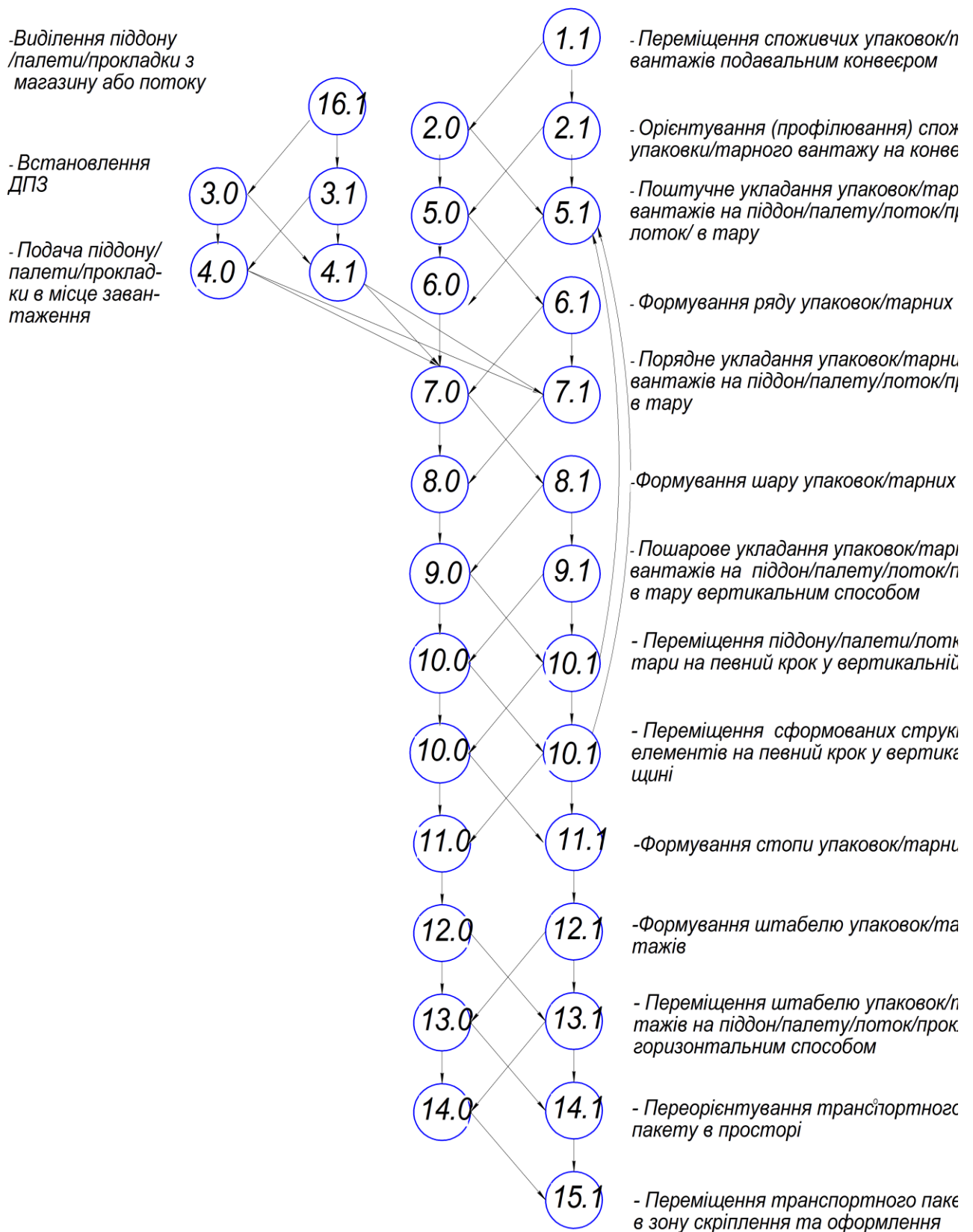


Рис. 1.3 Структурно-технологічний граф процесу формування транспортного пакета із тарних вантажів.

Ця послідовність відповідає технологічному процесу, у якому виконуються такі операції: 1.1 – переміщення тарних вантажів подавальним конвеєром ПФМ; 2.1 – орієнтування тарних вантажів; 4.1 – транспортування піддона до зони завантаження; 6.1 – формування ряду тарних вантажів; 8.1 – формування шару тарних вантажів; 9.1 (або 10.1) – укладання шару тарних вантажів на підйимально-опускную платформу; 15.1 – переміщення сформованого транспортного пакету в зону кріплення.

Однією з головних експлуатаційних витрат ПФМ є споживання енергії. А тому типовою послідовністю виконання операцій формування транспортного пакету, що є близькою до універсальної за цим показником;

### **1.1 – 2.1 – 4.1 – 5.1 – 15.1.**

Реалізація такого технологічного процесу пакетування можлива за умови використання лише робототехнічних комплексів при виконанні операцій: 1.1 – переміщення тарних вантажів подавальним конвеєром ПФМ; 2.1 – орієнтування тарних вантажів; 4.1 – транспортування піддона до зони завантаження; 5.1 – поштучне укладання одиничного тарного вантажу; 15.1 – переміщення сформованого транспортного пакету в зону скріплення та оформлення. Витрати енергії в разі реалізації такого процесу зменшуються за рахунок суміщення операцій формування транспортного пакету з одиничних тарних вантажів. Такий процес формування має значні переваги – швидке переналагодження, малі динамічні навантаження на тарний вантаж за рахунок контролю кінематичних складових руху робочих органів, велику точність формування схем перев’язки транспортного пакету та можливої рекуперації енергії.

### **1.2.2 Аналіз структурних схем і технічних характеристик роботизованих комплексів та їх функціональних модулів формування транспортних пакетів**

Для реалізації створення транспортних пакетів на підприємствах відправників та одержувачів вантажів із харчовими продуктами застосовуються машини для автоматичного і напівавтоматичного формування транспортних пакетів. Пакетоформуючі машини (ПФМ), за схемами формування транспортного пакету

поділяють на горизонтального, вертикального та комбінованого типів. Основними характеристиками роботи ПФМ є: висока продуктивність та надійність, функціональна точність, гнучкість до переналагодження при зміні розмірів, типу та виду тарних вантажів, типорозмірів піддона або схеми перев'язки стиків вантажів. Сучасні ПФМ дуже різноманітні за кінематичними схемами і конструкційним виконанням робочих органів [2, 9, 12 – 16]. За критерієм універсальності ПФМ поділяють на дві групи.




До першої групи відносять спеціальні машини. Вони характеризуються відносно жорсткими циклами технологічного процесу пакетування. А їх переналагодження можливе на рівні електронного керування за умови часткової заміни робочих органів та їх механічного переналагодження.


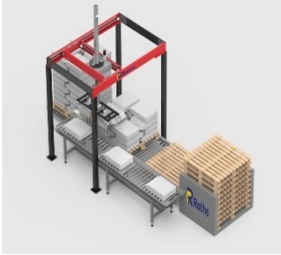


Встановлено, що коефіцієнт універсальності спеціальних ПФМ знаходиться в межах від 0,7 до 0,87. Такі невеликі показники свідчать, що в усіх випадках зміна форм, розмірів тарних вантажів або транспортної тари, спеціальне обладнання потребує часткового механічного переналагодження. Кількість модулів, які переналагоджуються, та їх функціональне призначення залежить від способу формування транспортного пакету.

ПФМ, які здатні адаптуватись до умов виробництва без механічного переналагодження (можлива часткова заміна пристрою захоплення), за рахунок різноманітних алгоритмів керування, відносяться до групи універсальних. Це здебільшого робототехнічні пакетоформувальні комплекси [17 – 38]. В робототехнічних комплексах формування транспортного пакету застосовуються два види роботів: порталні та важільні маніпулятори. Технічні та технологічні характеристики таких комплексів з порталними роботами наведено в таблиці 1.1, а з роботами маніпуляторами важільного типу в таблиці 1.2. За результатами проведеного аналізу встановлено, що основною операцією в робототехнічних комплексах формування транспортного пакету є укладання одиничного тарного вантажу або сформованого з нього структурного елемента шляхом переміщення їх в горизонтальній та вертикальних площинах.

Таблиця 1.1





## Зведені характеристики робототехнічних комплексів на основі порталних робіт

N/N	Марка обладнання та найменування виробника	Ілюстрація обладнання	Вид захоплюючого пристрою	Продуктивність	Вид вантажу	Вид засобів пакетування	Ступінь вільності	Зведена потужність, кВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	PCO 700 компанії «Аквипак».		Механічний	700 циклів за годину, максимальна вага вантажу 30 кг	М'які в мішках, жорсткі тарні вантажі	Піддон	4	4,9
2	PAL 30 компанії «Fipal».		Механічний	120 шарів за годину, максимальна вага вантажу 50 кг	М'які в мішках	Піддон	4	7
4	PLS-C 1500 компанія «Mollers»		Механічний	1500 одиниць за годину, максимальна вага вантажу 30 кг	М'які в мішках, жорсткі тарні вантажі	Піддон	5	5,5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	Gantry Palletizer компанії «MIDC»		Механічний	30 циклів за годину, максимальна вага вантажу 50 кг	Жорсткі тарні вантажі	Піддон	4	<b>8,7</b>
6	Компанія «Rothe packtech»		Механічний	7 циклів за хвилину, максимальна вага вантажу 80 кг	Жорсткі тарні вантажі	Піддон	4	<b>12,7</b>
7	Компанія Alfotec Group		Механічний	6 циклів за хвилину вага вантажу 150 кг	М'які в мішках, жорсткі тарні вантажі	Піддон	4	<b>6,9</b>
8	Terram G 600 Компанії HAVER & BOECKER		Механічний	800 одиниць за годину, максимальна вага вантажу 30 кг	Жорсткі тарні вантажі	Піддон	4	<b>8</b>

## Зведені характеристики робототехнічних комплексів на основі важільних роботів-маніпуляторів

N/N	Марка обладнання та найменування виробника	Ілюстрація обладнання	Вид захоплюючого пристрою	Продуктивність	Вид споживчої упаковки	Вид засобів пакування	Ступінь вільності робота	Зведена потужність, кВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Пакетоформувальна машина "Falcon" компанія «Fipal»		Механічний, вакуумний, магнітний	до 250 шарів за годину, максимальна вага вантажу 180 кг	Жорсткі: тарні вантажі, споживчі упаковки, коробки, ящики, bag in box, бутлі	Піддон	4 або 6	5
2	Робот KR 120 R3200 компанія STAMH		Механічний, вакуумний, магнітний	56 циклів за хвилину, максимальна вага вантажу 120 кг	Жорсткі: тарні вантажі, споживчі упаковки, коробки, ящики	Піддон	5	5,5
3	KR CYBERTECH ARC компанії «GVP Equipment solutions».		Механічний, вакуумний, магнітний	20 одиниць за хвилину, максимальна вага вантажу 200 кг	Жорсткі: тарні вантажі, споживчі упаковки, коробки, ящики	Піддон	4	6
4	Робот ABB компанії «ІТ Черкизово»		Механічний, вакуумний, магнітний	50 циклів за годину, максимальна вага вантажу 80 кг	Жорсткі: тарні вантажі, споживчі упаковки, коробки, ящики	Піддон	5	5,3

5	Робот Mespick компанії «ESCO»		Механічний, вакуумний, магнітний	18 одиниць за хвилину, максимальна вага вантажу 16 кг	Жорсткі: тарні вантажі, споживчі упаковки, коробки, ящики	Піддон	5	<b>2,8</b>
6	Робот Yaskawa компанії «Skladpack»		Механічний, вакуумний, магнітний	26 циклів за хвилину, максимальна вага вантажу 7 кг	Жорсткі: тарні вантажі, споживчі упаковки, коробки, ящики	Піддон	4	<b>2,5</b>
7	Робот компанії «SERPA»		Механічний	20 циклів за хвилину, максимальна вага 7 кг	Жорсткі: тарні вантажі, споживчі упаковки, коробки, ящики	Піддон	4 або 6	<b>2,75</b>
8	Робот Robotier компанії «TOPTIER»		Механічний, вакуумний	8 шарів за хвилину, максимальна вага вантажу 30 кг	Жорсткі: тарні вантажі, споживчі упаковки, коробки, ящики, мішки	Піддон	6	<b>3,9</b>
9	Робот Robostack компанії «Hartness»		Механічний, вакуумний	150 шарів за годину, максимальна вага вантажу 90 кг	Жорсткі: тарні вантажі, споживчі упаковки, коробки, ящики	Піддон	4 або 6	<b>4,7</b>

Більшість робототехнічних пакетоформуючих комплексів здатні формувати транспортні пакети з тарних вантажів різної конфігурації та маси зі змінними схемами перев'язки за умови використання універсальних пристроїв захоплення. Встановлено, що коефіцієнт універсальності для робототехнічних комплексів знаходиться в межах від 0,9 до 0,98. Велике значення показника універсальності важільних роботів-маніпуляторів забезпечується переналагодженням лише на рівні програмного забезпечення у вигляді зміни програми для мікропроцесорної системи керування. Хоча переналагодження порталних роботів, при зміні розмірів та форм тарних вантажів, передбачає механічну заміну модуля захоплення та переналаштування модулів орієнтування, тому значення їх коефіцієнта універсальності менше і знаходиться в межах 0,88-0,93.

Енергоспоживання робототехнічних комплексів знаходиться в межах від 3 кВт до 12 кВт і залежить від максимальної ваги тарних вантажів. Спостерігається тенденція зменшення споживання енергії в роботах-маніпуляторах в середньому до 20% в порівнянні з порталними роботами за умови однакової вантажопід'ємності. Це можна пояснити активним впровадженням в їх конструкції енергозберігаючих приводів та удосконалення структурних схем керування.

Встановлено, що використання роботів-маніпуляторів у пакетоформувальних лініях крім переваг має ряд недоліків. Серед основних – велика кількість можливих траєкторій рухів пристрою захоплення і як наслідок, виробник отримує багатофункціональний робототехнічний пакетоформувальний комплекс за велику вартість для вирішення обмежених технологічних процесів. Переналагодження комплексу потребує додаткового «навчання» робота і високої фахової підготовки обслуговуючого персоналу.

Основною перевагою робототехнічних пакетоформуючих комплексів у порівнянні із ПФМ спеціалізованого призначення є можливість реалізації технологічних процесів формувати транспортний пакетів з різних за видом і типом тарних вантажів, наповнених продукцією різної номенклатури та можливістю швидкого переналагодження системи під час зміни форми, розмірів, ваги, циклу укладання, кількості тарних вантажів тощо.

Типову структуру робототехнічного пакеформуального комплексу наведено на рис 1.4. Прикладом такого комплексу є робот Master 500 виробництва компанії TMG IMPIANTI (Італія). Такий робототехнічний комплекс може одночасно укладати два види тарних вантажів, для чого комплектується змінними пристроями захоплення, які можуть захоплювати і переміщувати як одиничний тарний вантаж, так і ряд.

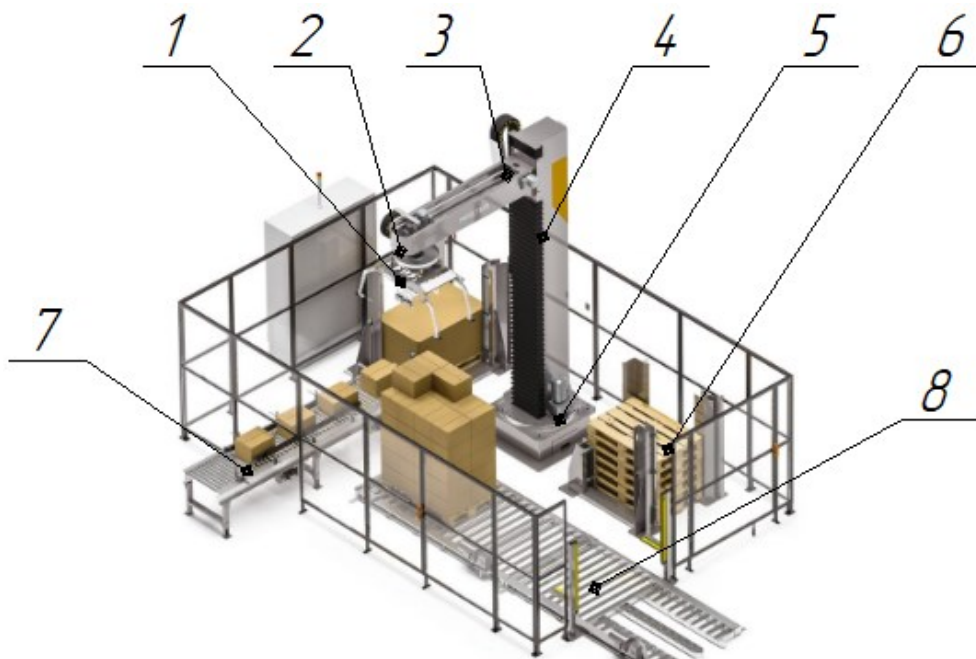


Рис. 1.4 Автоматичний одноколонний робот Master 500, виробництва компанії TMG IMPIANTI (Італія): 1 – захоплююча головка; 2 – механізм повороту головки на кут  $360^\circ$ ; 3 – модуль горизонтального переміщення пристрою захоплення; 4 – модуль вертикального переміщення пристрою захоплення; 5 – модуль повороту колони; 6 – магазин порожніх піддонів; 7 – конвеєр подачі тарних вантажів; 8 – відвідний конвеєр сформованого транспортного пакету.

Для забезпечення схем перев’язки захоплююча головка додатково може повертатися на кут  $360^\circ$ . Тарний вантаж з виробничої лінії подається приводним конвеєром 7. З магазину піддонів 6 робот переміщує в зону формування один порожній піддон. Захоплююча головка 1 захоплює одиничний або сформований ряд тарних вантажів та шляхом одночасного поєднання складних рухів в просторі (повороту захоплюючої головки 2, піднімання 3, переміщення в горизонтальній

площі 4 та повороту колони 5) укладає об'єкти відповідно до заданої програми на піддон. Сформований транспортний пакет подається відвідним конвеєром 8 на скріплення.

За результатами порівняльного аналізу різних груп пакетоформуєчих технічних засобів для пакованих харчових продуктів можна зробити висновок, що використання промислових роботів у пакувальних лініях формування транспортних пакетів з харчовими продуктами суттєво розширює їх універсальність, зменшує час переналагодження та витрати питомої енергії на формування транспортного пакету за рахунок оптимального виконання технологічних операцій. Поряд із цим використання типових важільних роботів з великою кількістю можливих траєкторій рухів пристрою захоплення суттєво збільшує собівартість робототехнічних комплексів. Аналіз виробництв харчової продукції встановив нагальну потребу в проектуванні нових зразків робототехнічних пакетоформувальних комплексів на основі модульного принципу проектування та мехатронних систем керування.

За результатами проведених досліджень конструкцій вітчизняних та закордонних зразків робототехнічних пакетоформувальних комплексів розроблено їх класифікацію (рис. 1.5). Відповідно до наведеного аналізу визначено структурні схеми функціональних модулів робототехнічних комплексів для формування транспортних пакетів із тарних вантажів (таблиця 1.3).

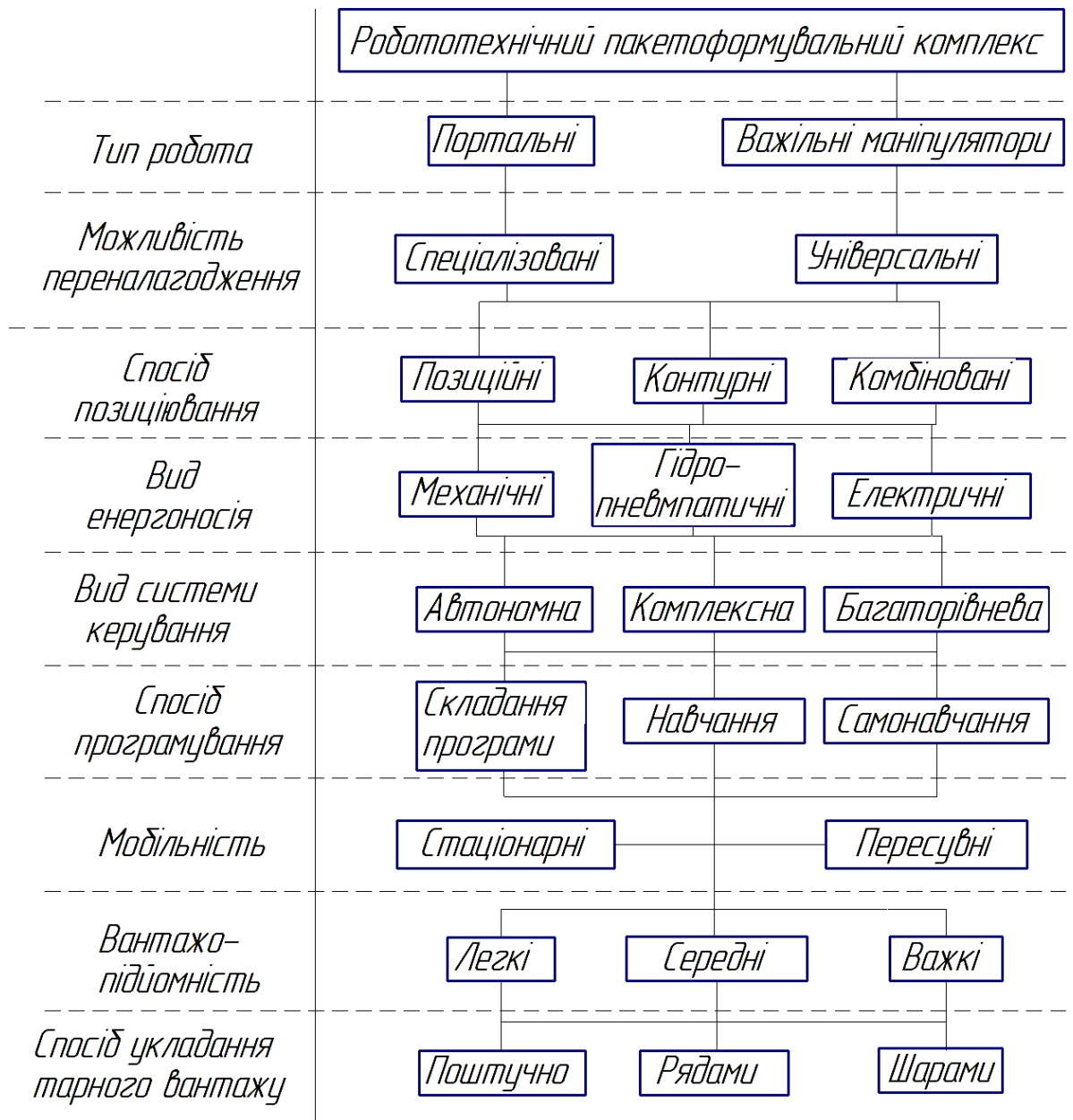
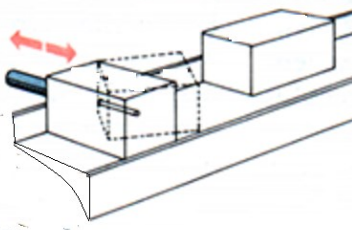
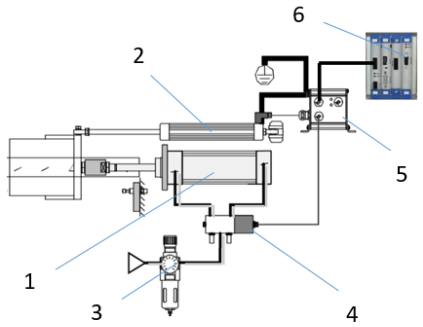
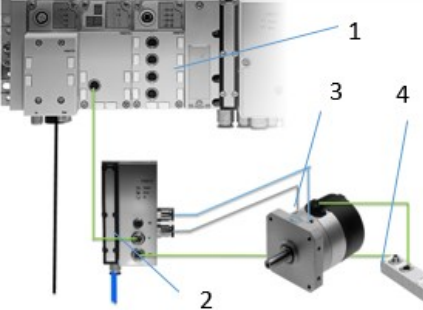
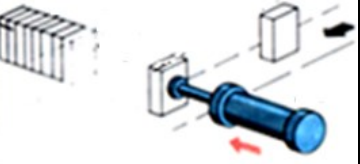
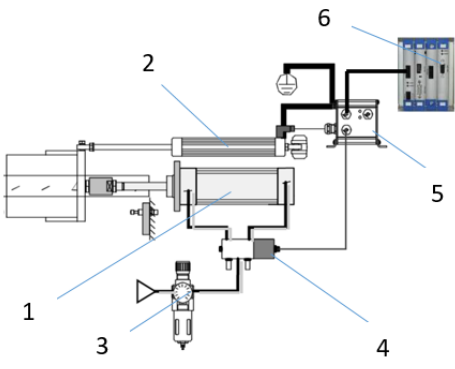
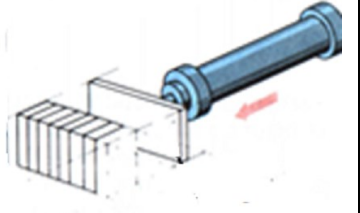
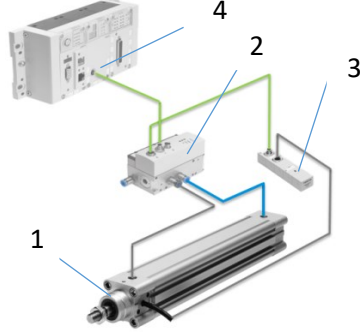
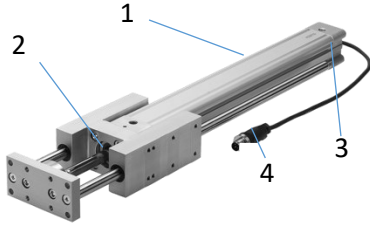
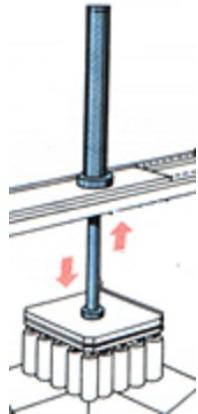
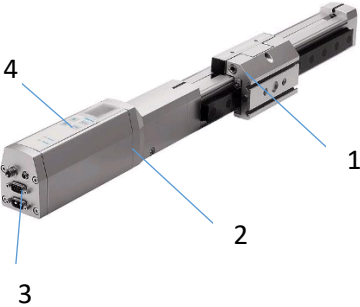
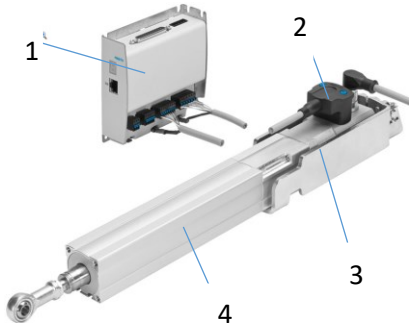
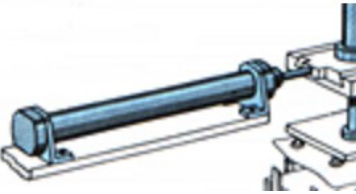
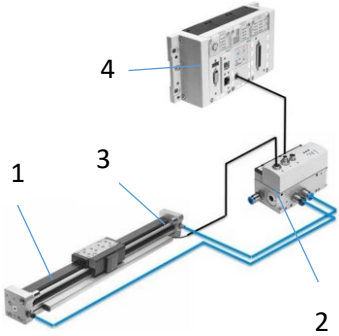


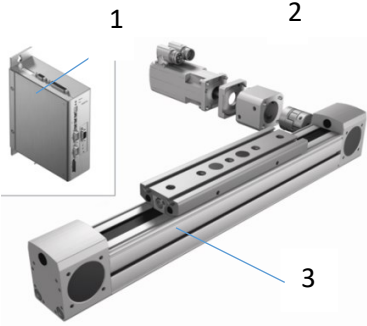
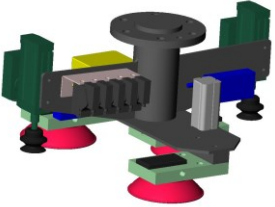
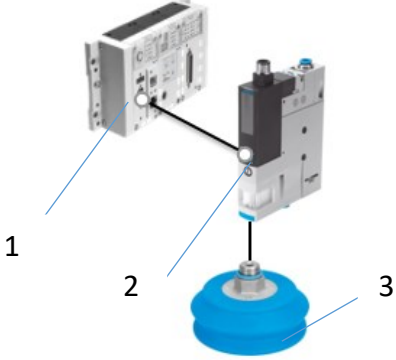

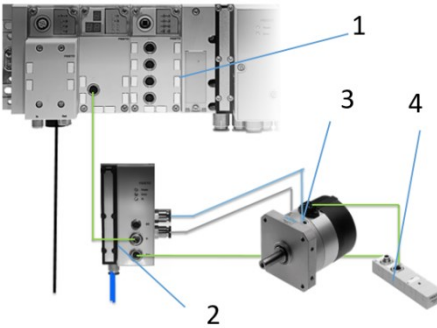
Рис. 1.5. Класифікація роботизованих комплексів для формування транспортних пакетів із харчовими продуктами

**Узагальнені структурні схеми функціональних мехатронних модулів робототехнічних комплексів для  
формування транспортного пакету із харчовими продуктами**

№	Назва функціонального модуля	Схема технологічної операції	Параметр зворотного зв'язку виконавчого пристрою	Тип привода	Узагальнена структурна схема керування функціональним модулем	Елементна база системи керування функціональним модулем
1	2	2	3	4	5	6
1	Орієнтування	<p>Рухомі та нерухомі упори:</p> 	Координата	Пневматичний		<p>1 – пневмоциліндр; 2 – потенціометричний датчик; 3 – система підготовки повітря; 4 – розподільник із пропорційним керуванням; 5- блок оброблення сигналів; 6 – контролер нижнього рівня</p>
				Електричний		<p>1 – контролер нижнього рівня; 2 – колектор електричних сигналів; 3 – серводвигун; 4 – колодка для датчиків зворот-ного зв'язку</p>

2	Формування ряду	<p>Поштучне зіштовхування:</p> 	Координата, швидкість	Пневматичний	 <p>1 – пневмоциліндр; 2 – потенціометричний датчик; 3 – система підготовки повітря; 4 – розподільник із пропорційним керуванням; 5 – блок оброблення сигналів; 6 – контролер нижнього рівня</p>
		<p>Порядне зіштовхування:</p> 	Координата, швидкість	Пневматичний	 <p>1 – пневмоциліндр; 2 – розподільник із пропорційним керуванням; 3 – блок броблення сигналів; 4 – контролер нижнього рівня</p>
		 <p>1 – пневмоциліндр; 2 – потенціометричний датчик; 3 – розподільник з пропорційним керуванням; 4 – блок обробки сигналів;</p>			

1	2	3	4	5	6	7
3	Підіймання/опускання	<p>Вертикальне переміщення:</p> 	Координата, швидкість	Пневматичний,		<p>1 – пневмоциліндр;  2 – розподільник із пропорційним керуванням;  3 – блок оброблення сигналів;  4 – контролер нижнього рівня</p>
				Електричний		<p>1 – контролер нижнього рівня;  2 – колектор електричних сигналів;  3 – серводвигун;  4 – вісь для отримання лінійного переміщення штоку</p>
4	Переміщення	<p>Горизонтальне переміщення:</p> 	Координата, швидкість	Пневматичний,		<p>1 – пневмоциліндр;  2 – розподільник із пропорційним керуванням;  3 – блок оброблення сигналів;  4 – контролер нижнього рівня</p>

1	2	3	4	5	6	7
				Електричний		<p>1 – контролер нижнього рівня;  2 – серводвигун;  3 – вісь лінійного переміщення штоку</p>
5	Захоплення	<p>Фіксування :</p> 	Координата, зусилля	Пневматичний, Магнітний		<p>1 – контролер нижнього рівня;  2 – вакуумний генератор;  3 – присмоктувач;</p>
			Координата, зусилля,	Пневматичний ,механічний		<p>1 – контролер нижнього рівня;  2 – колектор електричних сигналів;  3 – серводвигун;  4 – колодка для датчиків зворотного зв'язку</p>

З аналізу конструкцій функціональних модулів встановлено, що робототехнічні комплекси формування транспортних пакетів із харчовими продуктами це взаємозв'язана сукупність функціонально-мехатронних модулів, кількість та призначення яких визначається сукупністю технологічних операцій формування транспортного пакету. Наприклад, під час формування транспортних пакетів з використанням засобів пакетування структура робототехнічного комплексу доповнюється механізмом скріплення.

Традиційно механізми подачі тарного вантажу та піддонів виконуються у вигляді окремих конвеєрів або їх систем. Пристрої орієнтування об'єднуються з механізмами подачі тарних вантажів або формування ряду і мають різні конструктивні виконання. Модуль формування транспортного пакету складається з пристроїв переміщення у вертикальній та горизонтальній площинах, підйимально-опускної платформи тощо. Конструкції цих пристроїв є найбільш складними, а їх робота визначає продуктивність та енерговитрати робототехнічного комплексу.

З аналізу конструкцій функціональних модулів встановлено, що робототехнічні комплекси формування транспортного пакету з харчовими продуктами оснащують електромеханічними та пневмомеханічними приводами. Майже не використовується гідромеханічні приводи у зв'язку з їх невеликою швидкодією. До складу електропривода входять підсилювачі потужності, покрокові або серводвигуни постійного та змінного струму, передаточні механізми, датчики зворотного зв'язку. Зв'язок двигунів із виконавчими механізмами здійснюється через механічні передачі та редуктори. Кожен функціональний модуль із електромеханічним приводом комплектується датчиками зворотного зв'язку для контролю швидкості, положення та зусилля.

Широке застосування в конструкціях функціональних модулів робототехнічних комплексів формування транспортного пакету отримав пневматичний привод [39 – 57] маючи вагомні технічні переваги: відносно проста конструкція пневмоциліндрів і поворотних пневмомоторів, надійність роботи в широкому діапазоні температур. Поряд з типовими схемами керування пневмоциліндрами, в конструкціях робототехнічних комплексів застосовується

пневматичний слідкуючий привод для забезпечення реалізації переміщення за заданим законом руху з одночасною зупинкою в проміжних точках ходу. Структура керування таких систем пов'язана з забезпеченням кінематичних та динамічних характеристиках технологічних процесів. Основними пневматичними елементами в таких схемах є розподільники та регулятори тиску із пропорційним керуванням. Схеми керування пропорційними елементами потребують використання контролера та зворотних зв'язків. Керування такими розподільниками здійснюють шляхом зміни вхідного електричного сигналу напруги або струму.

Для визначення перспектив впровадження в робототехнічні комплекси слідкуючих приводів проведений огляд та зроблений аналіз структурних схем керування функціональних модулів (таблиці 1.4 – 1.5). Порівняння здійснювалось за такими ознаками: ефективність використання кожного типу привода та системи керування ним у напрямках реалізації заданих кінематичних та динамічних характеристик; точність позиціонування; гнучкість зміни технологічного циклу; вид зворотного зв'язку. Під поняттям «зворотний зв'язок» розуміють систему контролю параметрів технологічного процесу в реальному часі з метою впливу на їх зміну [39, 42, 43, 45]. Аналіз систем зворотного зв'язку показав, що основними елементами в них є датчики [39, 45]. В сучасних робототехнічних комплексах формування транспортного пакету з харчовими продуктами система зворотного зв'язку надає повну інформацію в режимі реального часу. З аналізу конструкцій стає очевидним, що всі системи автоматичного керування умовно поділяють на три групи. До першої групи відносять системи, в яких контроль відбувається по кінематичним характеристикам робочого органу або тарного вантажу. Такі схеми керування по координаті мають три різновиди зворотних зв'язків: по координаті, швидкості та прискоренні. До другої групи відносять системи з контролем по зусиллю виконавчого механізму або робочого органу. У таких схемах керування застосовуються зворотні зв'язки з інформацією сили струму, тиску або зусилля. До третьої групи відносяться схеми, в яких контроль відбувається по геометричним

розмірам або розташуванні в просторі виконавчого механізму або робочого органу. Системи такого типу комплектуються зворотніми зв'язками технічного зору.

Сучасні камери технічного зору мають можливість визначати не тільки координати об'єктів, але і виміряти їх розміри, розпізнати колір, тип та вид матеріалів.

Встановлено, що найбільш перспективними слідкуючими приводами для реалізації зворотно-поступального руху робочих органів у модулях робототехнічних комплексів формування транспортного пакету з харчовими продуктами, з точки мінімальної кількості перетворюючих механізмів є електропривод з лінійним двигуном та пневмопривод зі стандартним або безштоковим циліндром.

### **1.3 Критичний аналіз наукових праць присвячених створенню машин і робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів**

Дослідження структури, конструкції ПФМ, технологічних операцій наведені в наукових працях [1 – 16]. В дослідженнях наводиться методика, проектування пакетоформувань машин з урахуванням їх продуктивності, структурних схем створення пакетів, параметрів тарного вантажу та засобів пакетування, способів подачі тарних вантажів, умов експлуатації машини.

Так, комплексний підхід до розрахунку і конструюванню пристроїв і механізмів ПФМ, наведено в роботі [2]. В цій роботі наведено аналіз конструкцій ПФМ залежно від характеристик пакетованих вантажів та засобів їх пакетування, структури транспортних пакетів та математичні моделі взаємодії тарних вантажів з конструктивними елементами пакетоформувань машин.

Детальна класифікація пристроїв та механізмів пакетоформувань машин розглянуто в роботах [1, 2, 14, 15]. Автори наводять методики розрахунку: пристроїв для орієнтації вантажів на конвеєрі нерухомим упором з урахуванням нерівномірного розподілення тиску по опорній поверхні вантажу; пристроїв формування рядів тарних вантажів та способи накопиченням їх на конвеєрі; пристроїв переміщення рядів тарних вантажів; стулок для вкладання шару вантажів на піддон або раніше вкладений шар, механізмів переміщенням платформи

підіймально-опускного механізму з кроковим режимом. Однак, наведені методики є частково не актуальними у зв'язку з застосуванням нового покоління приводів робочих органів.

Велика частина наукових робіт присвячена способам формування транспортних пакетів, а саме: структурі пакету та кількості одиниць тарних вантажів і схемам їх розміщення в пакеті, наявності і конструкції засобів пакетування, способів скріплення вантажів та схемам обв'язки. Аналіз оптимального використання площі піддону наведено в роботах [5 – 8].

В роботах [2, 9] вдосконалено методи аналізу параметрів виконавчих пристроїв ПФМ на початкових стадіях їх проектування та обґрунтовано необхідність їх уточнення на стадіях експлуатування. Однак за умов активного розвитку нових технологій приводів, систем керування та зворотних зв'язків, наведених авторами кількісних показників технічної ефективності ПФМ недостатньо.

В роботі [1, 2, 8] наведено результати впливу динамічних навантажень, тривалості їх циклів на робочі органи та запропоновано рішення у вигляді реалізації законів руху. З аналізу робіт [1, 2, 9] встановлено, що механізми формування ряду та шару, укладання шару є найбільш обмежувачами щодо продуктивності ПФМ.

Експериментальні дослідження щодо переміщення тарних вантажів з однієї робочої поверхні на іншу та їх орієнтування, наведені в роботах [8, 11 – 16].

У закордонних інформаційних джерелах питанням розрахунку пневмомеханічних та електромеханічних приводів в мехатронних модулях технологічного обладнання присвячені роботи [24, 25, 51, 52, 88, 89, 91, 92] та інші. Аналіз робіт показує, що з розвитком матеріально-технічної бази пневматики, електрики та електроніки в математичних моделях необхідно враховувати технічні характеристики елементів керування, способ регулювання параметрів та можливість постійного контролю за процесом їх роботи. Перспективним напрямком є використання приводів з відслідковуванням технологічних характеристик їх роботи. Суттєвим підґрунтям для використання слідкуючих приводів в обладнанні для формування транспортного пакету є нові розробки та

дослідження сучасних сервосистем із електро– гідро- та пневмо- приводами, наведених у роботах [58 – 80]. Новим кроком є розробка положення теорії проектування сервосистем з комп'ютерним керуванням описаних в роботах [81 – 104]. Автори робіт роблять висновок, про перспективи розвитку електропневматичних та електромеханічних приводів для мехатронних модулів в напрямку збільшення їх швидкодії, позиціювання та точності реалізації законів руху. Напрями вдосконалення методик створення нового покоління обладнання з різними сервосистемами розглянуто в роботах [72 – 83].

В індустріальних джерелах наведено результати досліджень геометричних, кінематичних та динамічних властивостей промислових роботів, які виконують операції формування транспортного пакету. В цих працях проведені дослідження структури виконавчих пристроїв промислових роботів [27, 28 – 32, 47], аналіз кінематичних параметрів виконання технологічних операцій [8 – 16, 25, 32, 61]. В особливу групу робіт можна виділити вирішення задач синтезу виконавчих пристроїв та динаміки промислових роботів [23, 32, 44, 61, 62, 103 – 108]. Невелика кількість наукових робіт присвячена дослідженню енергетичної ефективності мехатронних модулів [45, 107, 109 – 118]. До найбільш вагомих досліджень, результати яких можна використати для проектування робототехнічних комплексів формування транспортного пакету, можна віднести роботи [45, 107]. Автори робіт стверджують, що витрати енергії приводами виконавчих пристроїв промислових роботів залежать від виду технологічної операції та траєкторії виконавчих пристроїв для її реалізації. В науковій роботі також частково проаналізовані дисипативні властивості систем приводів виконавчих пристроїв та наведена методика порівняльного аналізу енергетичних витрат на виконання технологічної операції за різних траєкторій руху виконавчого пристрою.

В особливу групу можна виділити наукові роботи, в яких наведені методики та принципи підбору пристроїв захоплювання для робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів [2, 15, 119 – 132]. У роботах [2, 120 – 126] наводиться опис конструкцій пристроїв захоплювання та методика їх розрахунку. Пристроєм маніпулювання штучними об'єктами та питанням автоматизації

технологічних процесів із застосуванням робототехнічних комплексів присвячені роботи [17 – 19, 49 – 53]. Однак наведені конструкції пристроїв захоплювання та маніпуляторів можуть забезпечити виконання технологічних операцій виробів з металу і мають обмежене використання в пакувальному обладнанні.

У роботах [2, 127 – 132] розглянуто застосування вакуумних захоплюючих пристроїв для переміщення виробів. Наведені методики розрахунку і підбору таких захоплюючих пристроїв не враховують фізико-механічні властивості паку-вальних матеріалів і можуть лише наближено використовуватись для проектування пневматичних пристроїв захоплювання для формування транспортних пакетів.

Велика кількість робіт присвячена багатокритеріальному синтезу пакувальних машин [8, 12, 13, 103 – 108]. Автори наводять методики виконання параметричного та структурного синтезу і розглядають задачі по їх застосуванню. Наведені методики здебільшого застосовані для оптимізації окремих конструкцій пристроїв та механізмів і потребують доопрацювання, зокрема, для їх використання при проведенні параметричного синтезу обладнання формування транспортних пакетів.

Таким чином аналіз наукових праць присвячених створенню машин і робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів показав відсутність комплексного підходу до проектування спеціалізованих робототехнічних систем для формування транспортних пакетів, а лише наявність окремих вирішених задач щодо створення таких комплексів. Поряд із цим розробка та впровадження спеціалізованих робототехнічних комплексів для формування транспортних пакетів харчових продуктів стримується відсутністю системного підходу та під час їх проектування та врахування енергозберігаючих технологій.

#### **1.4. Висновки по розділу та постановка задач досліджень.**

На основі проведеного аналізу конструкцій та технічних характеристик робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів із харчовими продуктами, вивчення наукових робіт, присвячених дослідженню операцій та пристроїв формування транспортного пакету можна зробити такі висновки:

– в Україні і за кордоном ведуться інтенсивні роботи з розробки високоефективних робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів

із харчовими продуктами на базі функціонально-мехатронних модулів. Основною перевагою такого обладнання є отримання спеціалізованих робототехнічних комплексів, які відповідають заданій технологічній задачі, можуть програмно переналагоджуватись у межах попередньозаданих характеристик та мають малі енергетичні і експлуатаційні витрати;

– проведений аналіз конструкцій робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів із харчовими продуктами дає можливість зробити висновки, що для компоновки такого обладнання використовується обмежена номенклатура функціональних модулів, а їх кількість залежить від схеми формування і скріплення транспортного пакету; нові конструкції спеціалізованих робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів із харчовими продуктами доцільно розробляти на базі функціонально-мехатронних модулів вертикального та горизонтального переміщень із додатковим набором модулів захоплювання; керування робототехнічними комплексами формування транспортних пакетів із харчовими продуктами здійснюється електронною системою за умови використання зворотних зв'язків;

– існує потреба розроблення комплексного підходу до проектування функціонально-мехатронних модулів робототехнічних комплексів формування транспортного пакету за різними схемами та встановлення критеріїв ефективності для їх оцінки;

– для проектування нових функціонально-мехатронних модулів лінійного переміщення тарного вантажу в горизонтальній та вертикальній площинах та його захоплювання потрібно розробити нові та доповнити існуючі методи їх розрахунку з урахуванням впровадження засобів рекуперації енергії;

– встановлено, що використання пневмоприводів в функціональних модулях лінійного переміщення є оптимальним технічним рішенням для реалізації заданого закону руху виконавчого пристрою з одночасною рекуперацією енергії, що перетворює їх на нове покоління функціонально-мехатронних модулів;

– проаналізовані наукові праці не дають повної відповіді щодо вирішення проблеми проектування нових робототехнічних комплексів та функціонально-

мехатронних модулів для формування транспортних пакетів із харчовими продуктами не зважаючи на великий перелік наукових робіт, присвячених розробці роботів різного покоління.

Проведений аналіз конструкцій існуючих робототехнічних комплексів для формування транспортних пакетів із харчовими продуктами та літературних джерел дав можливість сформулювати такі **завдання дослідження**:

- проаналізувати сучасний науково-технічний стан машин та робототехнічних комплексів для формування транспортних пакетів із харчовими продуктами відповідно до їх структури, мобільності, енерговитрат, продуктивності та точності позиціонування;

- розробити методологічний підхід до проектування функціонально-мехатронних модулів робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів із харчовими продуктами;

- виконати декомпозицію службової функції, морфологічний аналіз та синтез структури типових мехатронних модулів робототехнічних комплексів формування структурних елементів транспортного пакету з метою створення їх нових конструкцій, що виконують максимальну кількість корисних функцій та відповідають критеріям технічної ефективності.

- розробити та провести параметричний синтез запропонованих конструкцій функціонально-мехатронних модулів з пневматичним та електромеханічним приводами з метою реалізації функцій рекуперації енергії;

- провести експериментальні дослідження розроблених функціонально-мехатронних модулів роботизованих комплексів формування транспортних пакетів із харчовими продуктами для перевірки адекватності теоретичних результатів досліджень.

## РОЗДІЛ 2. ПРОГРАМА, ПРЕДМЕТ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1. Програма, об'єкт та предмет досліджень.

Програма теоретичних та експериментальних досліджень функціонально-мехатронних модулів робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів із харчовими продуктами показує алгоритм дій для досягнення поставлених завдань і виконувалася за наступною послідовністю [133 – 141]:

- 1) структурні схеми конструкцій робототехнічних комплексів та їх функціональних мехатронних модулів для формування транспортного пакету із харчовими продуктами;
- 2) математичні моделі функціонально-мехатронних модулів: горизонтального та вертикального переміщення тарних вантажів з пневматичним та електромеханічним приводом; вакуумного захоплюючого пристрою для тарних вантажів;
- 3) фізичні моделі пілотних зразків запропонованих конструкцій функціональних мехатронних модулів: горизонтального та вертикального переміщення тарних вантажів; вакуумного захоплюючого пристрою для тарних вантажів;
- 4) експериментальні дослідження пілотних зразків запропонованих функціонально-мехатронних модулів: вертикального переміщення тарних вантажів з пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії; горизонтального та вертикального переміщення тарних вантажів з електромеханічним приводом; вакуумного захоплюючого пристрою для тарних вантажів з функцією енергозбереження;
- 5) оброблення результатів експериментальних досліджень стандартними статистичними методами з допомогою програмного забезпечення: Microsoft Excel, MathCad та SolidWorks;
- 6) кінцеві результати експериментальних досліджень функціонально-мехатронних модулів у критеріальній формі: вертикального переміщення тарних вантажів з пневматичним приводом; горизонтального та вертикального переміщення тарних вантажів з електромеханічним приводом; вакуумного захоплюючого пристрою для тарних вантажів;

- 7) практичне підтвердження математичних результатів моделювання параметрів функціонально-мехатронних модулів: вертикального переміщення тарних вантажів з пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії; горизонтального та вертикального переміщення тарних вантажів з електромеханічним приводом; вакуумного захоплюючого пристрою для тарних вантажів з функцією енергозбереження;
- 8) узагальнення результатів математичних та експериментальних досліджень шляхом виявлення загальних закономірностей в структурах та системах керування функціонально-мехатронних модулів: вертикального переміщення тарних вантажів з пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії; горизонтального та вертикального переміщення тарних вантажів з електромеханічним приводом; вакуумного захоплюючого пристрою для тарних вантажів з функцією енергозбереження;

Морфологічний аналіз та синтез структури робототехнічних комплексів для формування транспортного пакету та їх функціональних модулів проводились за методиками описаними в наукових роботах [1, 2, 45]. Багатокритеріальний синтез структури функціонально-мехатронних модулів робототехнічних комплексів проводився за методиками, наведеними в наукових роботах [105 – 108]. В процесі розробки математичних моделей функціонально-мехатронних модулів робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів з пневмомеханічним приводом використовувались системи нелінійних диференційних рівнянь [45]. Системи включали рівняння зміни тиску в порожнинах пневмоциліндра та рівняння руху зведених мас робочих органів функціонально-мехатронних модулів та рухомих елементів пневмоциліндра. Системи рівнянь вирішувалися чисельними методами за допомогою прикладних математичних пакетів Microsoft Excel, MathCad та SolidWorks. Перехідні процеси в порожнинах пневмоциліндра розглядалися квазістаціонарними. Стиснене повітря розглядалось як ідеальний газ, а всі процеси відбуваються при адіабатному режимі [ 119 – 132 ]. Живлення пневоприводів у мехатронних модулях робототехнічних комплексів приймалося постійним з незмінним тиском і температурою.

Теплообмін між повітрям в порожнинах пневмоциліндра з навколишнім середовищем не враховувався. Була прийнята умова [127 – 129], що зміни характеристик стисненого повітря та його теплопередача в порожнинах пневмоциліндра відбуваються достатньо швидко, тому температура в порожнинах пневмоциліндра встигає вирівнюватись до температури навколишнього середовища в кожний момент часу.

Для дослідження динаміки функціонально-мехатронних модулів машин формування транспортних пакетів з позиційним електромеханічним приводом використовувались методи теорії автоматичного керування, теоретичної механіки, математичного аналізу, математичної фізики і сучасні числові методи [133 – 141]. Автоматичне керування описувалось лінеаризованими системами рівнянь, при створенні яких були прийняті припущення [143]. Так для спрощення опису умов стійкості стаціонарних станів системи керування та способів реалізації ними заданих законів руху початкова нелінійна математична модель в області невеликих відхилень розглядалась як лінійна.

Визначені в першому наближенні аналітичні значення параметрів роботи функціонально-мехатронних модулів роботизованих комплексів формування транспортних пакетів з позиційним електричним приводом були в подальшому уточнені в процесі експериментальних досліджень з урахуванням особливостей їх кінематичних схем та впливу зовнішніх факторів.

Для теоретичного дослідження характеристик вакуумних функціонально-мехатронних модулів з функцією енергозбереження побудована математична модель на основі даних з експериментального аналізу, які були оброблені з використанням методів ідентифікації активного експерименту. Отримані результати в подальшому використані для удосконалення структури керування вакуумними генераторами, синтезу алгоритмів керування з реалізацією їх мікропроцесорними системами керування.

Обґрунтування параметрів вибору конструкційних елементів системи керування функціонально-мехатронними модулями, можливості реалізації ними силових та кінематичних характеристик під час виконання функціональних

операцій формування структурних елементів транспортного пакету з тарних вантажів було перевірено на роботі пілотних зразків запропонованих функціонально-мехатронних модулів горизонтального та вертикального переміщення з пневматичним та електромеханічним приводами, пристрою захоплення для тарних вантажів.

Для дослідження динамічних та кінематичних параметрів функціонально-мехатронних модулів роботизованих комплексів формування транспортних пакетів, які характеризують дію робочих органів на структурні елементи транспортного пакету прийняті такі припущення:

- об’єкти прикладних досліджень процесу формування транспортного пакету
- штучні тарні вантажі із харчовими продуктами;
- одиничні тарні вантажі розглядаються як достатньо тверді тіла;
- формування транспортних пакетів відбуваються при постійних параметрах навколишнього середовища, які регламентовані нормативними документами України та вимогами ISO 8573-1:2010;
- коефіцієнти тертя в функціонально-мехатронних модулях формування транспортного пакету з функцією рекуперації енергії та вертикального переміщення тарних вантажів з пневматичним приводом під час виконання ними технологічних операцій формування транспортного пакету є функціонально залежними від швидкості ковзання, дані дослідження виконані в роботах [143, 144,], де наведені функціональні залежності для визначення коефіцієнтів тертя допускають лінійні апроксимації виду (2.1):

$$f(\dot{y}) = f_0 + k_1 \dot{y}; \quad f(\dot{y}) = f_0 - k_2 \dot{y}, \quad (2.1)$$

де  $f_0$  – коефіцієнт тертя покою;  $k_1$ ,  $k_2$  – коефіцієнти пропорційності, визначаються як тангенс кута нахилу апроксимуючої прямої до осі  $Y$ ;  $\dot{y}$  – швидкість елементів транспортного пакету та рухомих частин мехатронних модулів.

- характеристика зміни коефіцієнту зчеплення в мехатронному модулі вакуумного захоплюючого пристрою для тарних вантажів під час виконання

технологічних операцій утримання тарного вантажу була визначена експериментально.

Для проведення експериментальних досліджень використовувались методи планування експериментів [133 – 141] та статистики, методології активного експерименту, а їх результати фіксувалися в режимі реального часу за допомогою датчиків тиску, переміщення та витрат, блоку аналогово-цифрового перетворювачів, комп'ютера та програмних пакетів: Labview, FluidLab\_PA, CoDeSys. Оброблення результатів експериментальних досліджень здійснювалось стандартними статистичними методами з допомогою програмного забезпечення: Microsoft Excel, MathCad та SolidWorks.

**Об'єктом дослідження** в даній роботі є функціональні зв'язки між структурою, кінематичними, силовими і енергетичними параметрами функціонально-мехатронних модулів роботизованих комплексів формування транспортних пакетів харчових продуктів

## **2.2. Досліджувані параметри та методи експериментальних досліджень.**

У процесі виконання роботи проводились такі експериментальні дослідження:

– встановлення зміни кінематичних, динамічних та енергетичних параметрів функціонально-мехатронних модулів лінійного переміщення з пневматичним та електромеханічним приводами в горизонтальній та вертикальній площинах під час формування структурних елементів транспортного пакету, які характеризувались параметрами змінних координат, швидкостей, рушійних сил та сил опору тощо;

– встановлення характеристик утримання тарних вантажів вакуумними пристроями захоплювання, які характеризувались змінними параметрами значення вакууму та типом пакувальних матеріалів тарних вантажів;

– встановлення часу виконання технологічної операції переміщення тарних вантажів в горизонтальній площині функціонально-мехатронним модулем з електромеханічним приводом для різних мас тарних вантажів, які характеризуються змінними параметрами величини напруги та силою струму керуючих електричних сигналів.

Для дослідження та розробки математичних моделей частково використані існуючі та розроблені автором нові методики. Для дослідження зазначених параметрів виготовлені пілотні зразки запропонованих конструкцій функціонально-мехатронних модулів. Для отримання максимально достовірних результатів досліджуваних параметрів досліди проводились на пілотних експериментальних зразках функціонально-мехатронних модулів в умовах, що були близькими до виробничих.

### **2.3. Експериментальна установка функціонально-мехатронного модуля покрокового переміщення платформи для формування структурних елементів транспортного пакету**

Експериментальна установка складається з трьох елементів (рис. 2.1): I – піднімально-опускний пристрій з пневматичним приводом для формування транспортного пакету; II – система керування функціонально-мехатронним модулем; III – електронна система фіксації експериментальних даних.

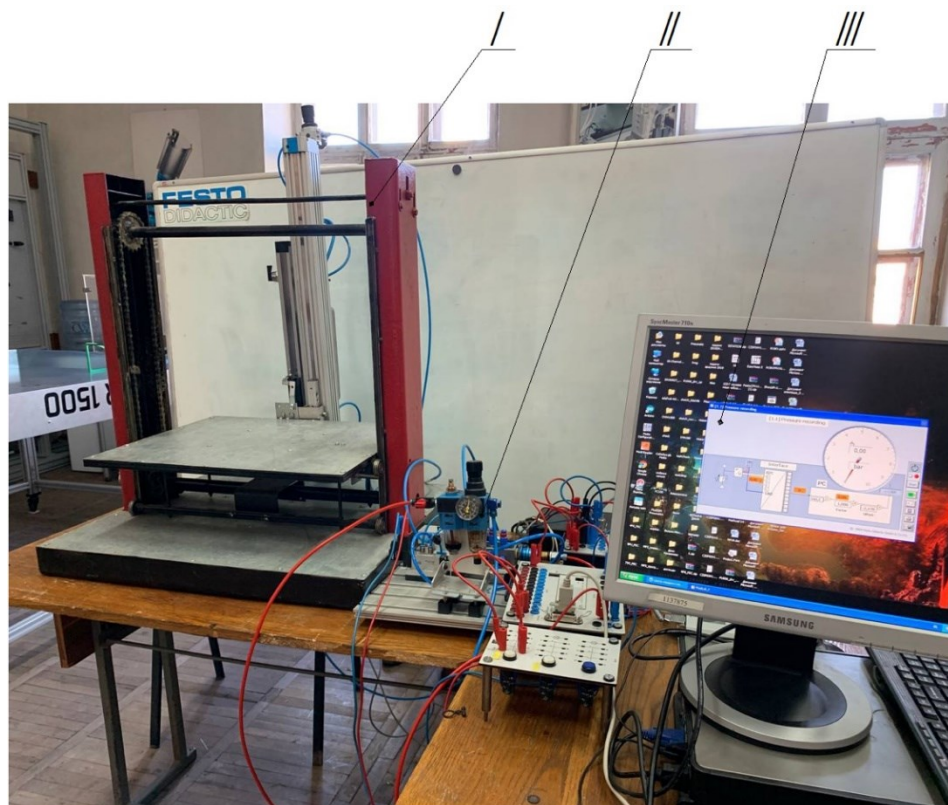


Рис. 2.1. Експериментальна установка функціонально-мехатронного модуля покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії для формування структурних елементів транспортного пакету

Конструкція піднімально-опускного пристрою функціонально- мехатронного модуля з пневматичним приводом для формування структурних елементів транспортного пакету складається (рис. 2.2) з вантажної платформа 1, яка з'єднана з кареткою безштокового пневматичного циліндра 2 і переміщується по напрямним 3. На пневматичному циліндрі 2 встановлено енкодер лінійного переміщення 4, який визначає миттєву координату положення поршня пневмоциліндра 2, що відповідає заданій координаті положення вантажної платформи 1. Для уникнення коливань платформи під час завантаження (укладання) шару тарних вантажів встановлений фіксатор 5 у вигляді пневмоциліндра одноструньної дії.

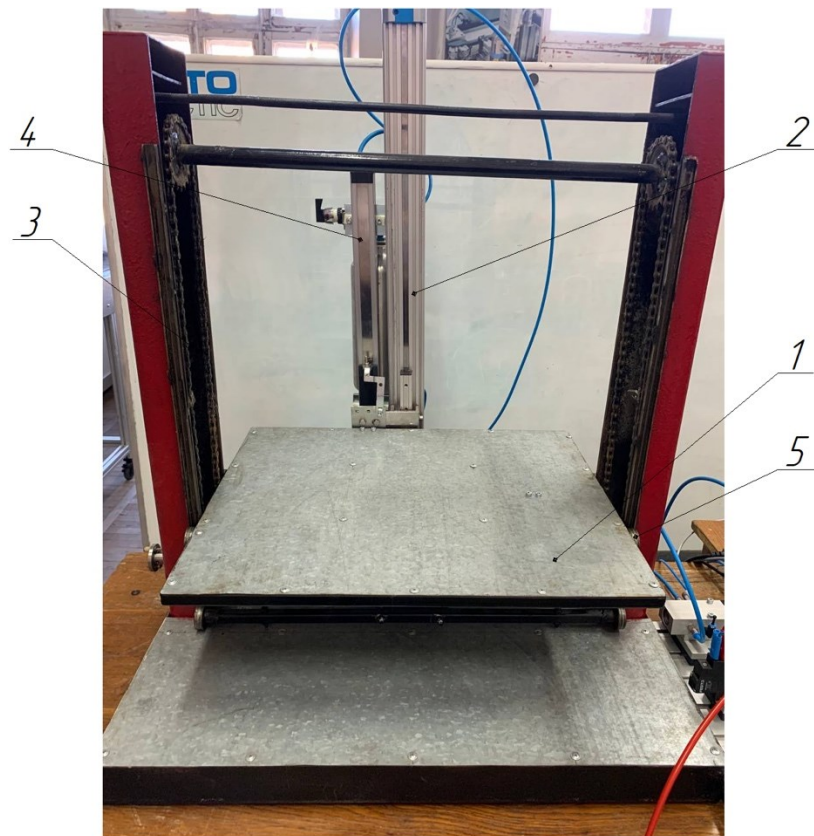


Рис. 2.2 Піднімально-опускний пристрій функціонально-мехатронного модуля з пневматичним приводом для формування структурних елементів транспортного пакету: 1 - вантажна платформа; 2 – пневматичний циліндр; 3 – напрямні; 4- енкодер лінійного переміщення; 5 - фіксатор

Акумуляція пневматичної енергії стисненого повітря відбувається в ресивері 6 (рис.2.3). До входу ресивера 6 під'єднаний регулятор тиску 7, який з

магістралі компенсує непродуктивні втрати повітря в пневматичній системі керування.

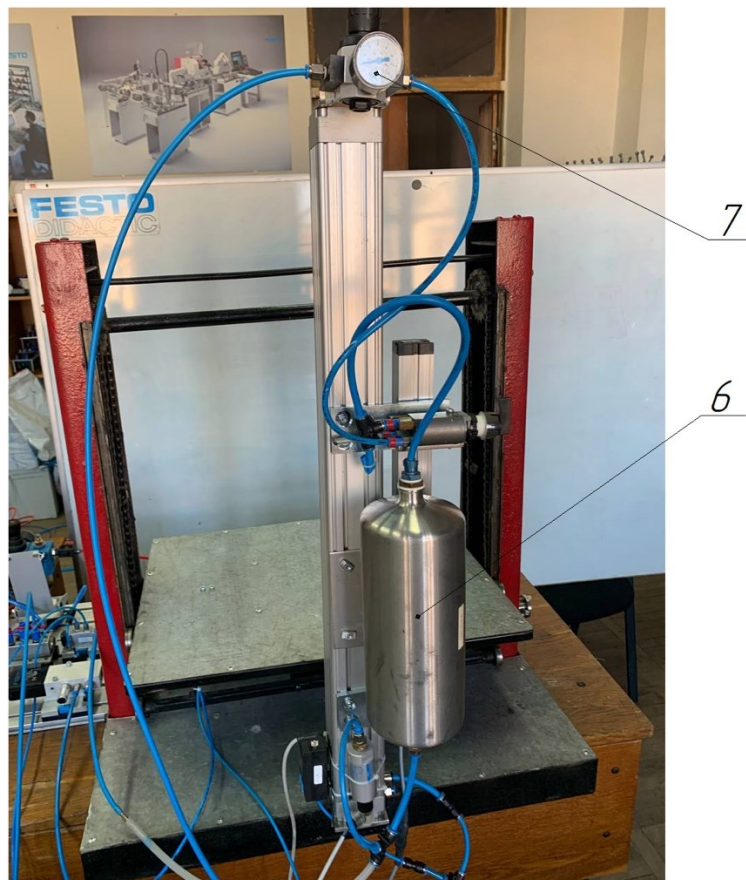


Рис.2.3 Конструкція пневматичного акумулятора: 6 – ресивер; 7 – регулятор тиску

Система керування функціонально-мехатронним модулем формування структурних елементів транспортного пакету складається (рис.2.4): з контролера 8 марки FE компанії «Festo», який керує технологічним процесом шляхом виконання спеціальної програми, розподільника 9 марки 3/2 для керування фіксатором 4, керованого дроселя (розподільника) потоку з пропорційним керуванням 10, блоку ручного керування 11, блоку аналогових входів та виходів 12 та блоку живлення 24 В -13.

Контроль тиску повітря у верхній порожнині пневмоциліндра 2 та в ресивері акумулятора 6 здійснюють два датчика тиску 13 та 14 з аналоговими вихідними сигналами (рис. 2.5).

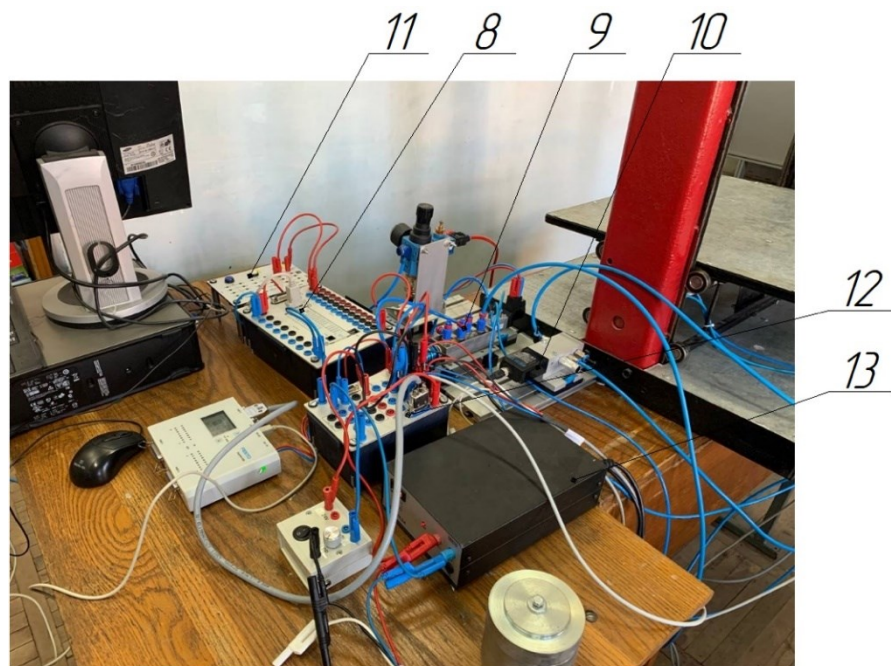


Рис. 2.4 Система керування функціонально-мехатронним модулем покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії для формування структурних елементів транспортного пакету

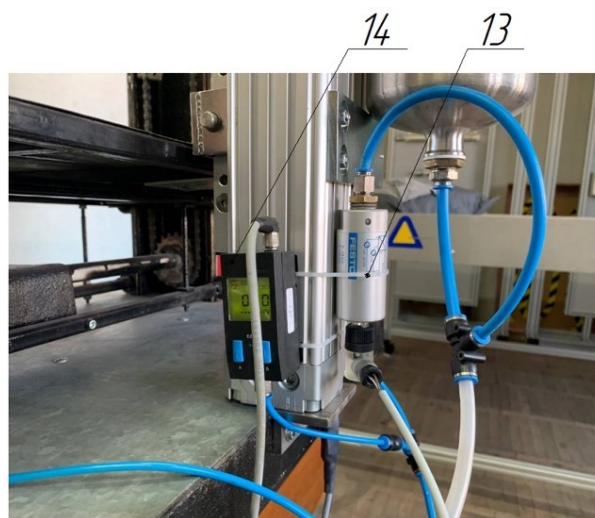


Рис.2.5 Система контролю тиску повітря в порожнині пневмоциліндра та в ресивері акумулятора

Основним елементом системи керування функціонально-мехатронним модулем покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом та

функцією рекуперації енергії є пропорційний клапан регулювання потоку стисненого повітря.

Конструкція клапану є золотниковою та керується аналоговим сигналом напруги  $0...10$  В. В експериментальній установці роль клапану виконував високодинамічний золотниковий пропорційний пневморозподільник МРУЕ з жорстким ущільненням компанії «Festo» (рис 2.6).

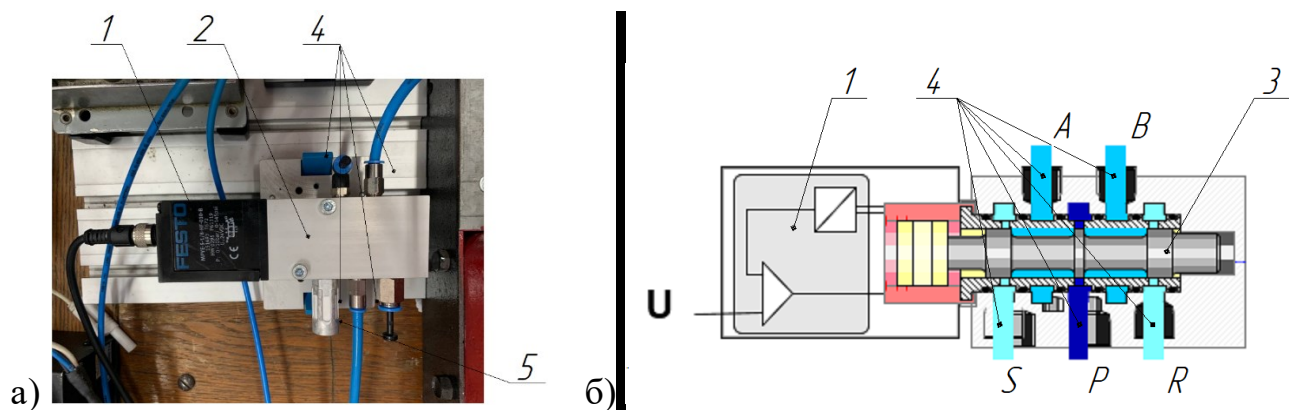


Рис. 2.6. Пропорційний пневморозподільник МРУЕ марки 5/2: а) загальний вигляд; б) конструкція: 1 – електромагнітна котушка керування аналоговим сигналом напруги  $0...10$ ; 2 – корпус; 3 – золотник; 4 – отвори для підключення розподільника: Р – до магістралі стисненого повітря; А,В – до виходи: R,S – скидання повітря в атмосферу; 5 – заглушка.

В схемі керування функціонального мехатронного модуля формування транспортного пакету з пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії використовується пропорційний клапан регулювання потоку марки 2/2. Для перетворення марки 5/2 в 2/2 в отвори псевморозподільника В і S були встановлені спеціальні заглушки б.

Електронна система фіксації експериментальних даних (рис. 2.7) складається з: аналоговоцифрового перетворювача 14, блоку аналогових входів та виходів 15 та комп'ютера 16 з спеціальним програмним забезпеченням FluidLab М компанії «Festo».

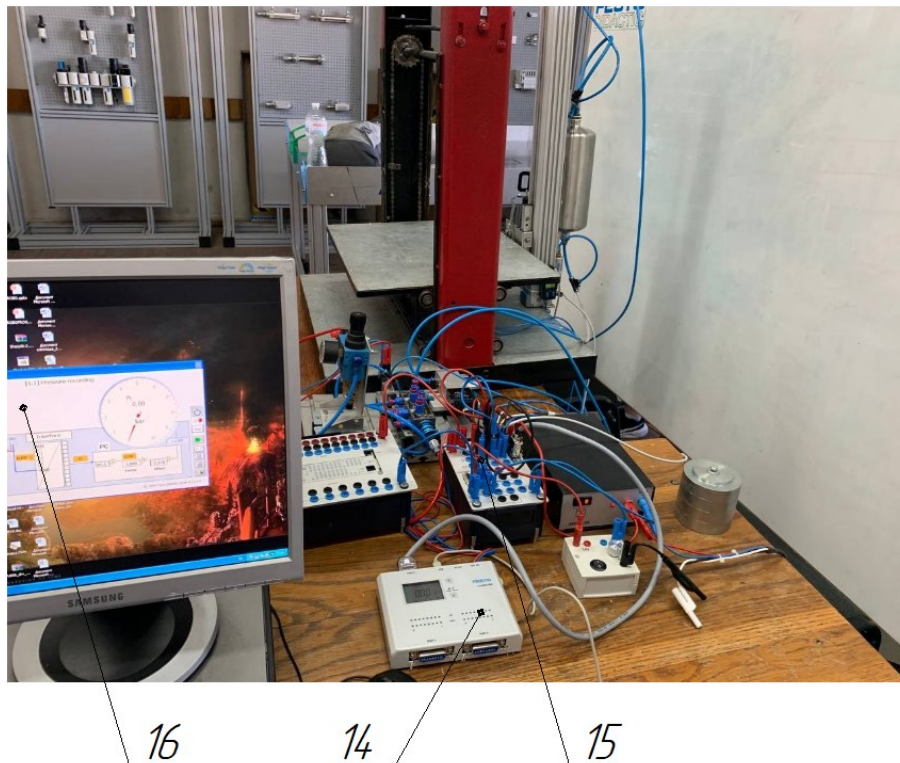


Рис. 2.7 Електронна система фіксації експериментальних даних роботи функціонально-мехатронного модуля покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії

Послідовність виконання технологічного процесу опускання платформи з шарами тарних вантажів забезпечує контролер електронної системи 8 за наступним алгоритмом: у початковий момент часу порожня платформа 1 піднята догори та жорстко зафіксована фіксатором 5. Розподільник 9 та керований дросель 10 знаходяться в закритому положенні. Відбувається переміщення першого шару з тарних вантажів на платформу. Після закінчення переміщення першого шару відключається фіксатор 5. Платформа під дією сили гравітації опускається донизу на відстань висоти шару та фіксується фіксатором 5 в положенні I (рис. 2.8, а).

Контроль координати позиції відбувається за допомогою сигналу із енкодера лінійного переміщення 4. В залежності від величини зведеної маси платформи та шару тарних вантажів одночасно з фіксатором може увімкнутися дросель 10, на який подається електричний сигнал керування заданої напруги. Повітря з нижньої

порожнини пневмоциліндра 2 через утворений канал в дроселі 10 попадає в акумулятор 6.

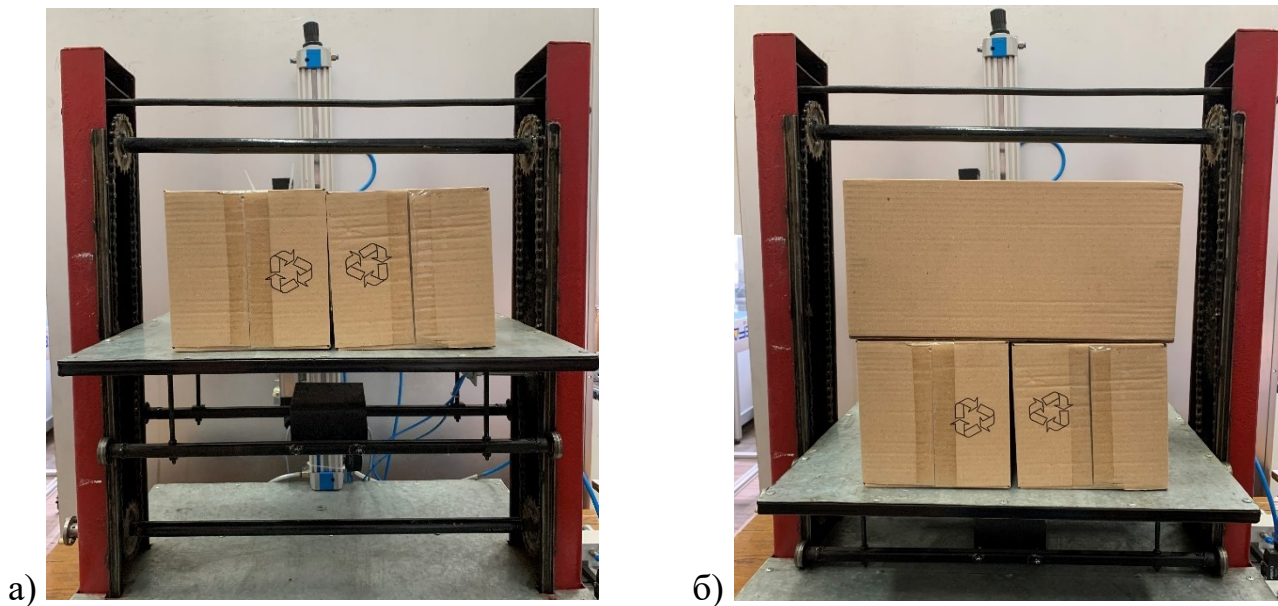


Рис.2.8. Позиціювання платформи з структурними елементами транспортного пакету: а - позиція I; б - позиція II.

Площа прохідного каналу дроселя відкривається на величину, що забезпечує опускання платформи до положення I. В момент, коли платформа підходить до координати зупинки I, в систему управління надходить сигнал із енкодера лінійного переміщення 4, керуючий дросель 10 перекриває робочий канал, а фіксатор 5 зупиняє платформу. Після завантаження другого шару на поверхню першого шару, фіксатор 5 знову виключається та включається дросель 10, платформа під дією гравітаційних сил тяжіння опускається донизу на відстань висоти другого шару та фіксується фіксатором в позиції II (рис. 2.8, б). Для забезпечення лінійної швидкості опускання платформи при укладенні може включитися регулятор тиску 7. При цьому повітря з заданим тиском подається у верхню порожнину циліндра та підсилює сумарну рушійну силу опускання платформи з шарами тарних вантажів. Завдяки періодичному підключенню регулятора тиску 7 швидкість опускання платформи можна миттєво регулювати. Після завершення формування транспортного пакету відбувається його зняття з

платформи. Паралельно з цим процесом вимикається розподільник 11 і стиснене повітря з верхньої порожнини пневмоциліндра скидається в атмосферу. Порожня платформа повертається у вихідне положення. Після вимкнення фіксатора 5 та вмикання керуючого дроселя 10 цикл формування нового транспортного пакету повторюється. Результати досліджень відобразатимуться на моніторі комп'ютера у вигляді графіків.

Методика проведення досліджень:

1. Початкове положення експериментальної установки - порожня платформа 1 піднята догори та жорстко зафіксована фіксатором 5. Розподільник 9 та керований дросель 10 знаходяться в закритому положенні;

2. В ручному режимі завантажується перший шар з тарних вантажів (масою  $m_i$ ) на платформу;

3. Після завершення переміщення першого шару натискається кнопка «Старт» на пульті керування. В контролері електронної системи керування починає виконуватися написана програма роботи платформи у відповідності до технологічного процесу формування транспортного пакету: відключається фіксатор 5 та включається система запису даних експериментальних досліджень;

4. Одночасно з відключенням фіксатора 5 платформа з шаром тарних вантажів під дією гравітаційних сил тяжіння опускається. Координату положення платформи відслідковує система керування через енкодер лінійного переміщення

4. При опусканні платформи на відстань висоти шару, контролер вмикає фіксатор 5 і платформа зупиняється в позиції I;

5. В ручному режимі завантажується другий шар тарних вантажів такою ж масою  $m_i$  на поверхню першого шару;

6. Натискається кнопка «Завантажено» на пульті керування, електронна система керування виключає фіксатор і платформа під дією сили гравітації опускається до низу. Якщо під час опускання платформи, величина тиску в нижній порожнині циліндра різко зростає і починає гальмувати рух платформи, то в цей момент відбувається з'єднання системи з ресивером акумулятора. Координату

положення платформи відслідковує система керування через енкодер лінійного переміщення 4. При опусканні платформи на відстань висоти другого шару, контролер вмикає фіксатор 5 і платформа зупиняється в позиції II (рис. 2.8, б);

7. Шари вантажів знімаються з платформи, після чого натискається кнопка «Вивантажено» на пульті керування, електронна система керування виключає фіксатор 5 і платформа за рахунок акумульованої енергії стисненого повітря повертається в початкове положення;

8. В режимі реального часу вимірюються зміна координати платформи та значення тиску в порожнині пневмоциліндра та ресивері акумулятора відповідними датчиками 13 та 14, сигнали від яких передаються на блок АЦП, де після перетворення в цифровий вигляд фіксуються спеціальною програмою на комп'ютері;

9. Розроблений алгоритм (1-8) використовувався для проведення експериментальних досліджень під час зміни маси шарів тарних вантажів, величини початкового тиску повітря в порожнині пневмоциліндра та часу опускання платформи;

10. В контролер 8 завантажувалася програма роботи системи, яка в режимі реального часу керує роботою дроселя 10 та відслідковує величини зворотних зв'язків по тиску та координаті;

11. Перевірка роботи запропонованої схеми функціонально-мехатронного модуля з функцією рекуперації енергії для формування транспортного пакету в експериментальній установці при виконанні п.4 та п.6 забезпечується електронною системою керування шляхом подачі електричного сигналу заданої напруги (від 0 В до 10 В) на дросель 10. В результаті цього відбувається зміна миттєвої площі прохідного каналу в дроселі. Через утворений канал забезпечуються різні характеристики витрат повітря, яке з нижньої порожнини пневмоциліндра 2 попадає в акумулятор 6. В момент, коли платформа підходить до координати зупинки I або II, в систему електронного керування надходить сигнал із енкодера лінійного переміщення 4, керуючий дросель 10 плавно перекриває робочий канал витоку повітря з циліндра в акумулятор;

12. Проведення експериментальних досліджень для визначення характеристик роботи функціонально-мехатронного модуля з функцією рекуперації енергії для формування транспортного пакету відбувалося по алгоритму (1-8) під час зміни маси шарів тарних вантажів, величини початкового тиску повітря в порожнині пневмоциліндра та часу опускання платформи.

Наведена методика експериментальних досліджень дає можливість дослідити та порівняти технічні та технологічні характеристики роботи функціонально-мехатронного модуля формування транспортного пакету з функцією рекуперації енергії та визначити оптимальну швидкодію та точність позиціонування платформи.

Основні технічні характеристики елементів експериментальної установки функціонально-мехатронного модуля формування транспортного пакету з пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

#### Характеристика елементів експериментальної установки

N/N	Найменування елемента	Компанія - виготовлювач	Одиниці вимірювання показників	Діапазон вимірювання	Похибка вимірювання	Примітки
1	Електронний датчик тиску SDE – 1 - 10	Festo, Німеччина	бар	0 - 10	±2 % від вимірюваного діапазону	–
2	Енкодер лінійного переміщення MLO-POT-450-TLF	Festo, Німеччина	мм	0..500	±0,05 мм від вимірюваного діапазону	Вихідний сигнал - аналог
3	Безштоковий циліндр DGP-40-520-PPV-A	Festo, Німеччина	мм	520	0.15 МПа ... 0.8 МПа	Кулькова направляюча
4	АЦП	Festo, Німеччина	мс	4	–	16 розрядний
5	Пропорційний розподільник МРУЕ-5-1/8-НФ-010-В	Festo, Німеччина	л/хв	700	0.4 % максимальний гістерезис	Конструкція -поршневий золотник
6	Контролер FEC-FC34-FST	Festo, Німеччина	кГц	1	–	FST software version 4.1

## 2.4 Експериментальна установка функціонально-мехатронного модуля лінійного переміщення тарних вантажів з електромеханічним приводом

Установка функціонально-мехатронного модуля лінійного переміщення тарних вантажів із електромеханічним приводом передбачає використання рухомої каретки в горизонтальній та у вертикальній площинах (рис. 2.9). Така конструкція активно використовується в порталних робототехнічних комплексах формування транспортних пакетів.

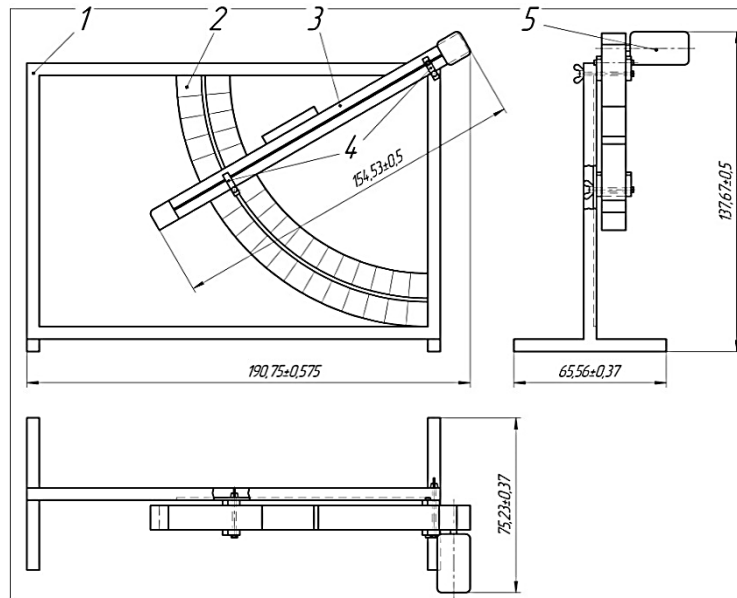


Рис. 2.9 Схема експериментальної установки функціонально-мехатронного модуля лінійного переміщення тарних вантажів з електромеханічним приводом: 1 – рама; 2 – механізм кріплення механічної вісі в горизонтальній та вертикальній площинах; 3 – механічна вісь; 4 – кріпильні елементи; 5 – серводвигун.

В конструкції установки використовується електричний сервопривод, що забезпечує позиціонування каретки механічної вісі 3 в заданій координаті укладання шару одиничного тарного вантажу. Враховуючи широкі технічні можливості використання сервосистем, конструкція експериментальної установки передбачала дослідження їх роботи і для операцій у вертикальній площині шляхом повороту виконавчого пристрою за допомогою механізму кріплення 2. Установка складається (рис.2.10) з рами 1, осі 2, електричного серводвигуна 3, контролера керування 4 та електричного блоку живлення 5. Технологічні та кінематичні

характеристики функціонально-мехатронного модуля переміщення каретки портального робота з електромеханічним приводом в режимі реального часу контролювалися за допомогою контролера 4 та одночасно через аналогоцифровий (АЦП) перетворювач передавалися на комп'ютер та записувалися за допомогою спеціальної програми.

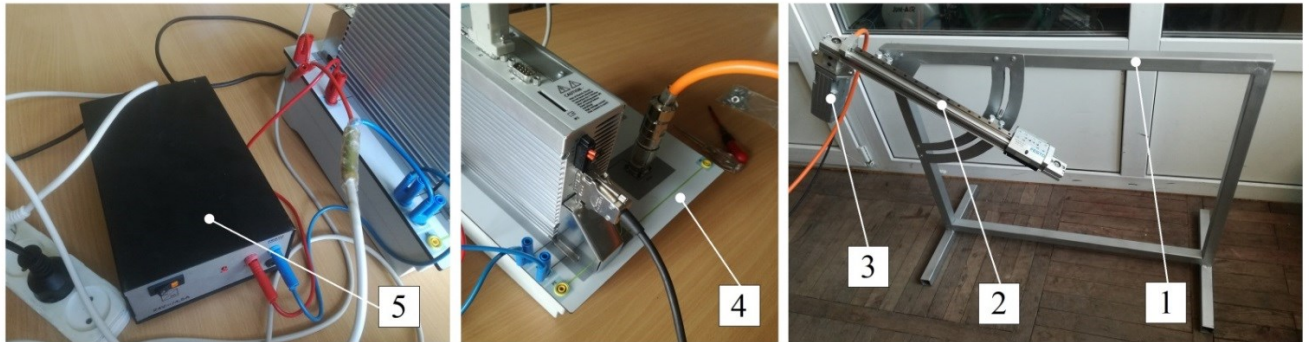


Рис. 2.10 Загальний вигляд експериментальної установки функціонально-мехатронного модуля лінійного переміщення тарних вантажів з електромеханічним приводом.

Особливістю конструкції установки є використання пристрою перетворення обертального руху вала електродвигуна в поступальний рух робочого органу (каретки). Сучасні конструкції таких пристроїв виробники називають «осями» 2. Робочим елементом «осей» є зубчатий пас. Кріплення «осей» до серводвигуна наведена на рис. 2.11.

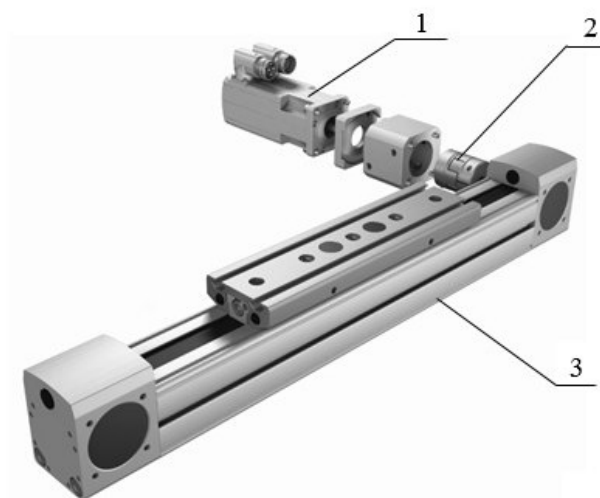


Рис.2.11 Монтаж «осі» до електродвигуна : 1 – електродвигун; 2 – муфта; 3 – «ось».

В установці використовується «ось» марки DGE-18-300-ZP-LV-RK-KG-KF-GK компанії «Festo». Основним елементом осі (рис.2.12) є два шківів 3, які поєднані між собою зубчатим пасом 4. до зубчатого паса прикріплена каретка 5, яка рухається по напрямній 6. Крутний момент від серводвигуна на шків осі передається через вал 2.

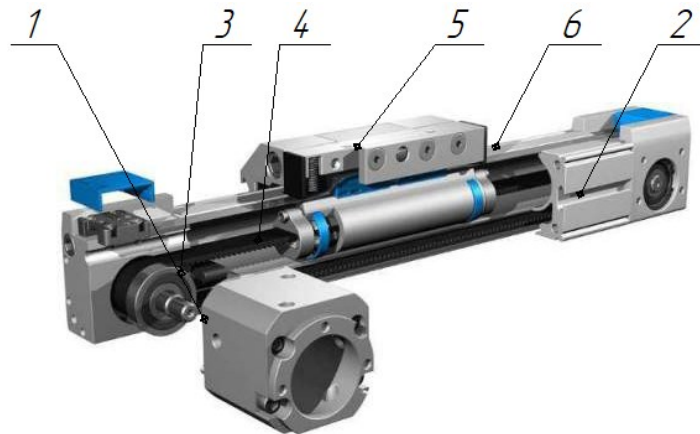


Рис.2.12 Конструкція «осі»: 1 – вхідний вал; 2 – корпус; 3 – шківів; 4 – зубчастий пас; 5 – каретка; 6 – напрямна каретки.

Серводвигун експериментальної установки марки MMS-ST-S7-S-SE-62 компанії «Festo» має вбудовану систему зворотного зв'язку у вигляді енкодера. Конструкція механізму зміни кута нахилу модуля лінійного переміщення наведена на рис. 2.13.

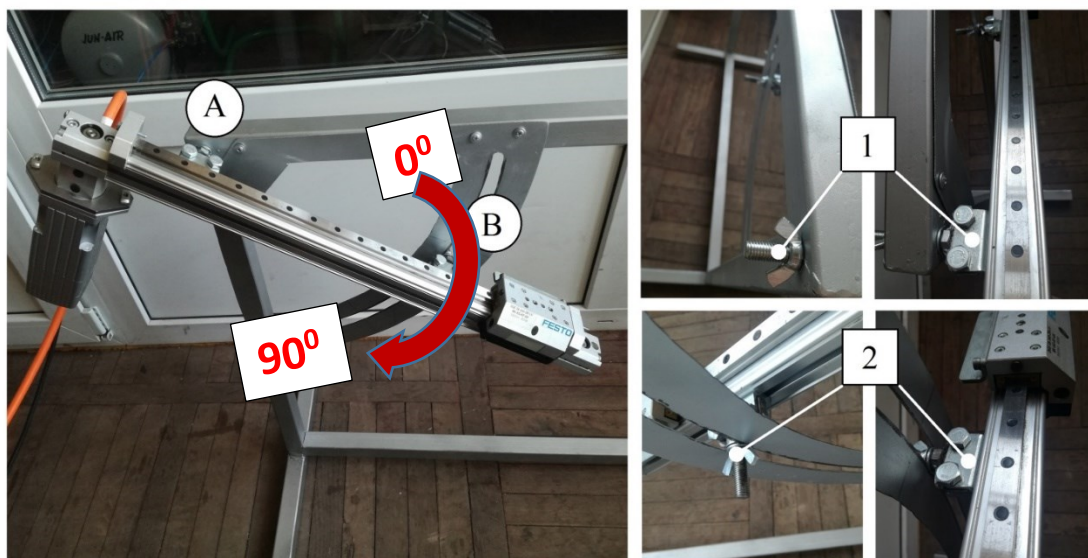


Рис. 2.13 Конструкція механізму зміни кута нахилу модуля лінійного переміщення тарного вантажу в просторі: 0° - 90°

Експериментальна установка функціонально-мехатронного модуля лінійного переміщення тарних вантажів з електромеханічним приводом працює наступним чином: на каретку 1 модуля лінійного переміщення 2 кріпиться вантаж різної маси 3 та встановлюється горизонтальне або вертикальне положення модуля лінійного переміщення (рис. 2.14).

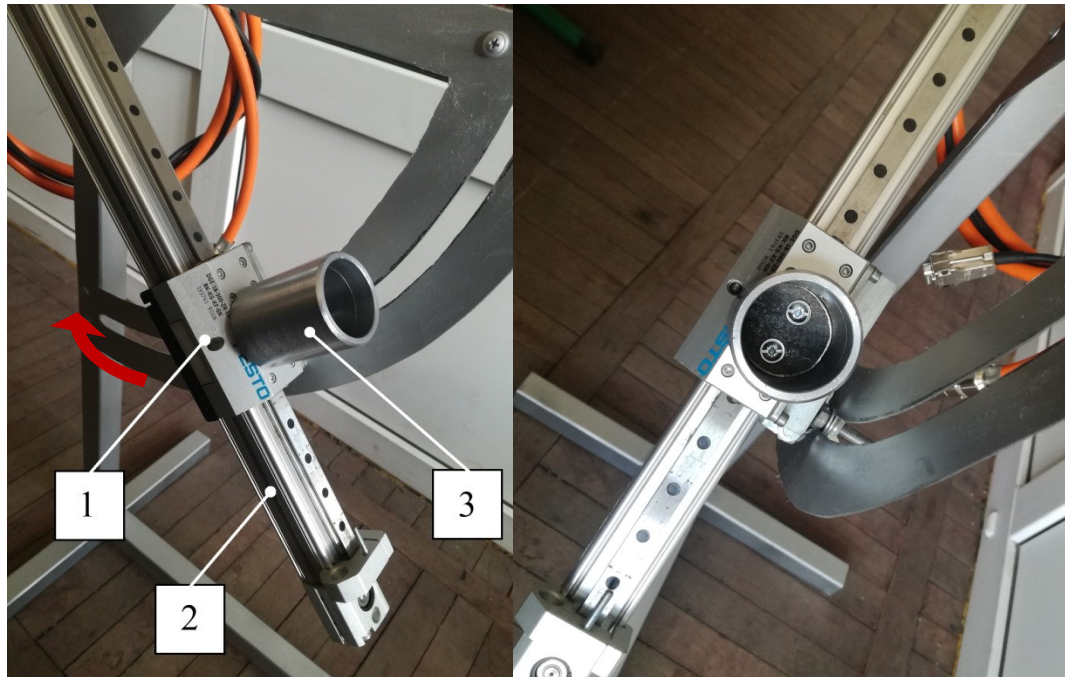


Рис. 2.14 Установка осі функціонально-мехатронного модуля лінійного переміщення у вертикальну площину та спосіб її навантаження

Для керування роботою каретки експериментальної установки функціонально-мехатронного модуля горизонтального переміщення тарних вантажів з електромеханічним приводом використовувався програмний продукт Festo Configuration Tools (компанії «Festo»), в якому формувалася конфігурація конструкції мехатронного модуля з окремих елементів.

Усі дані завантажуються у контролер, марки CMMS-AS-C4-3A-62 і по команді оператора каретка здійснювала переміщення.

Методика проведення досліджень:

1. За допомогою рухомого та нерухомого з'єднання встановлюється положення модуля: горизонтальна або вертикальна площина;

2. Каретка функціонально-мехатронного модуля лінійного переміщення тарних вантажів займає визначене початкове положення, на її поверхню кріпиться вантаж заданої маси  $m_i$ ;

3. В контролер керування лінійного двигуна задаються початкові і кінцеві координати переміщення, допустимі значення кінематичних та динамічних параметрів руху, зведена маса.

4. Натискається кнопка «Старт» на пульті керування. Вмикається експериментальна установка і реалізується операція переміщення кареткою вантажу;

5. В режимі реального часу вимірюються зміна координати каретки, електричні характеристики роботи серводвигуна та значення кінематичних та динамічних параметрів руху каретки;

6. Розроблений алгоритм (1-5) використовувався для проведення експериментальних досліджень по визначенню часу переміщення за умови зміни зведеної маси та обмеження максимальної швидкості;

7. Результати досліджень фіксуються комп'ютером у вигляді графіків зміни координати, швидкості та сили струму від часу

Наведена методика експериментальних досліджень дає можливість визначити час виконання технологічної операції переміщення тарних вантажів рухомою кареткою функціонально-мехатронного модуля лінійного переміщення з електромеханічним приводом за різними алгоритмами роботи в горизонтальній та вертикальній площинах при змінній масі тарних вантажів.

Основні технічні характеристики елементів експериментальної установки функціонально-мехатронного модуля лінійного переміщення тарних вантажів з електромеханічним приводом наведені в таблиці 2.2.

### Характеристика елементів експериментальної установки

N/N	Найменування елемента	Компанія виготовляч	Одиниці вимірювання	Діапазон вимірювання	Похибка вимірювання	Примітки
1	Контролер двигуна CMMS-AS-C4-3A-G2	Festo, Німеччина	мс	–	–	Швидкість передачі даних 1 Mbit/s
2	Серводвигун MMS-ST-57-S-SE-G2	Festo, Німеччина	%	16384 ppr	±5	Інкрементальний пристрій кута повороту
3	Ось DGE-18-300-ZR-LV-RK-KG-KF-GK	Festo, Німеччина	мм	0 – 300	± 0.08	Точність повторюваності

#### 2.5. Експериментальна установка функціонально-мехатронного модуля вакуумного захоплюючого пристрою.

В структурі роботизованих пакетоформувальних комплексів для переміщення тарних вантажів широко використовуються пристрої захоплювання. На основі аналізу конструкцій пристроїв захоплювання встановлено, що найбільш широко використовуються вакуумні пристрої.

Мета дослідження – встановлення зусилля утримання тарних вантажів функціонально-мехатронним модулем за умови змінних значень вакууму при різних діаметрах присмоктувача.

Загальний вигляд експериментальної установки для дослідження зусилля утримання тарного вантажу вакуумним присмоктувачем функціонально-мехатронного модуля пристрою захоплювання наведено на рис. 2.15.

Конструкція установки складається з корпусу 1, в середині якого знаходиться вакуумний присмоктувач 2 закріплений на жорсткій пластині 3. Пластина 3 з присмоктувачем 2 переміщується у вертикальній площині по двох напрямних 4. В

нижній частині корпусу 1 закріплена горизонтально розташована пластикова пластина 5 з перфорованими отворами по всій поверхні.

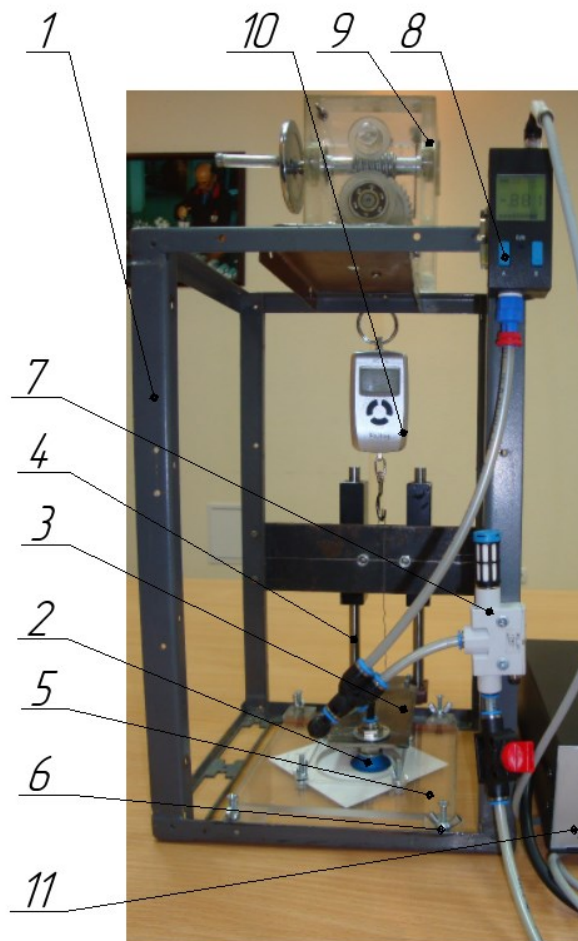


Рис. 2.15. Експериментальна установка для дослідження зусилля утримання тарного вантажу вакуумним присмоктувачем функціонально-мехатронного модуля: 1 – корпус установки; 2 – вакуумний присмоктувач; 3 - жорстка пластина, на якій закріплений вакуумний присмоктувач; 3 – електронний манометр; 4 – напрямні для вертикального переміщення пластини 3; 5 – пластина з перфорованими отворами; 6 – механізм кріплення досліджуваного зразка тарного вантажу; 7 – ежектор; 8 – електронний вакуумметр; 9 – пристрій для зміни рушійного зусилля; 10 – електронний динамометр; 11 – контролер.

Зверху пластини знаходиться механізм для кріплення досліджуваного зразка 6 тарного вантажу (рис.2.16). Отвір пластини механізма кріплення є змінний і залежить від діаметра присмоктувача. Розрідження в присмоктувачі 2 створює ежектор 7. Глибина вакууму вимірюється за допомогою електронного

вакуумметра 8. Конструкція установки передбачає прикладання до присмоктувача рушійного зусилля, при якому відбувається переміщення пластини 3 з присмоктувачем 2 у вертикальній площині по двох напрямних 4.

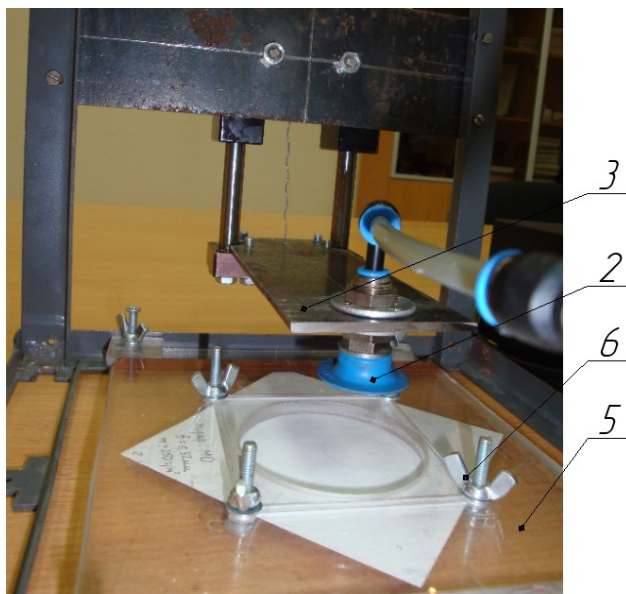


Рис. 2.16. Конструкція механізму закріплення досліджуваного зразка тарного вантажу: 2 – вакуумний присмоктувач; 3 – жорстка пластина, на якій закріплений вакуумний присмоктувач; 5 – пластина з перфорованими отворами; 6 – механізмом кріплення досліджуваного зразка.

Величина зусилля плавно змінюється за допомогою спеціального механічного пристрою з черв'ячним редуктором 9 та вимірюється електронним динамометром 10. Робота мехатронного модуля керується електронною системою за допомогою контролера 11. Сигнали від електронного датчика передаються до контролера та одночасно через аналогоцифровий (АЦП) перетворювач на комп'ютер і записуються спеціальною програмою.

Методика проведення досліджень:

1. Досліджуваний зразок матеріалу тарного вантажу закріплюється механізмом кріплення 6 (рис.2.15);

2. Закріплюється вибрана конструкція присмоктувача на пластину 3 та пластина підводиться механізмом переміщення 4 до досліджуваного зразка;

3. Кнопкою «Пуск» запускається робота електронної системи керування на контролері 11;

4. Контролер вмикає розподільник на компресорі і стиснене повітря з регульованим тиском подається в ежектор 7, починається процес створення вакууму в порожнині присмоктувача. Спостереження захоплювання присмоктувачем досліджуваного зразка ведеться через контроль величини вакууму, який показує електронний вакуумметр 7 та через аналогоцифровий (АЦП) перетворювач. Показники електричного вакуумметра записуються на комп'ютері спеціальною програмою;

5. Величина вакууму в присмоктувачі, яка передбачена планом експерименту регулюється надлишковим тиском з компресора за допомогою регулятора тиску на компресорі;

6. Величина зусилля утримання присмоктувача на поверхні тарного вантажу плавно збільшується за допомогою механічного пристрою 9 (рис.2.15) шляхом обертання ручки;

7. Зміна зусилля відриву вимірюється електронним динамометром, сигнал від якого передається на блок АЦП, де після перетворення в цифровий вигляд фіксується спеціальною програмою на комп'ютері; при певному критичному зусиллі присмоктувач відривається від поверхні зразка матеріалу тари;

8. Розроблений алгоритм (1-7) використовувався для проведення експериментальних досліджень під час зміни матеріалів тари, діаметрів присосок та величин вакууму;

Наведена методика експериментальних досліджень дає можливість дослідити величини утримання тарного вантажу з метою запобігання його відриву від вакуумного присмоктувача під час виконання операцій переміщення.

Основні технічні характеристики елементів експериментальної установки для дослідження зусилля утримання тарного вантажу від вакуумного присмоктувача функціонально-мехатронного модуля наведені в таблиці 2.3.

## Характеристика елементів експериментальної установки

N/N	Найменування елемента	Компанія - виготовлювач	Одиниці вимірювання показників	Діапазон вимірювання	Похибка вимірювання	Примітки
1	Електронний датчик тиску SDE – 1 - 10	Festo, Німеччина	бар	0 - 10	±2 % від вимірюваного діапазону	–
2	Електронний датчик вакууму	Festo, Німеччина	бар	-1 - 0	±2 % від вимірюваного діапазону	–
3	Електронний динамометр HDB 5K5	KERN, Німеччина	кг	0 - 5	Дискретність 5 г	–
4	АЦП	Festo, Німеччина	мс	4	–	16 розрядний
5	Ежектор VN-07-H-T4-PQ2-VQ2-O2-P	Festo, Німеччина	bar	-1 ... 0	±1,5 % від вимірюваного діапазону	max вакуум 92 %
6	Вакуумний генератор OVEM-10-H-B-GO-OE-N-2P	Festo, Німеччина	bar	-1 ... 0	±3 % від вимірюваного діапазону	max вакуум 93 %
7	Контролер SECC-S	Festo, Німеччина	кГц	1	–	П.З.: CODES YS

Експериментальна установка для дослідження коефіцієнта зчеплення тарного вантажу відносно вакуумного присмоктувача має конструкцію подібну за будовою до установки, що наведена на рис. 2.15. Основною відмінністю такої конструкції є переміщення пластини 3 з вакуумним присмоктувачем 2 відносно нерухомого зразка пакувального матеріалу тарного вантажу у вертикальній площині. Змінено конструкцію кріплення і розташування вакуумного присмоктувача 2 та жорсткої пластини 3. Пластина 5 з перфорованими отворами по всій поверхні та механізм для кріплення досліджуваного зразка 6 закріплені вертикально. Загальний вигляд механізму закріплення досліджуваного зразка експериментальної установки наведено на рис.2.17.

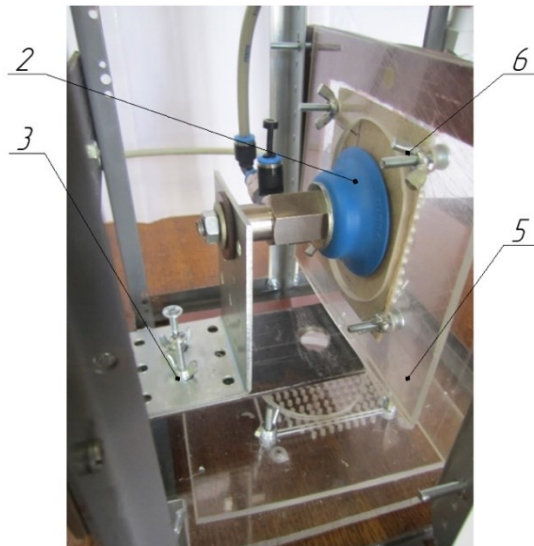


Рис. 2.17. Конструкція механізму кріплення досліджувального зразка пакувального матеріалу тарного вантажу та вакуумного захоплювача: 2 – вакуумний присмоктувач; 3 – жорстка пластина; 5 – пластина з перфорованими отворами; 11 – механізм кріплення досліджуваного зразка матеріалу тарного вантажу у вертикальній площині.

Технічні характеристики експериментальної установки наведені в таблиці 2.3. Методика проведення експерименту має таку ж послідовність (1-8), що описана вище.

Наведена методика експериментальних досліджень дає можливість дослідити залежність коефіцієнта зчеплення тарного вантажу з вакуумним присмоктувачем з метою запобігання явища зсуву за умови зміни глибини вакууму. Максимальний коефіцієнт зчеплення визначається за умови моменту початку зсуву вакуумного присмоктувача відносно поверхні пакувального матеріалу досліджувального зразка.

### **Висновки до розділу II.**

- Запропоновано та розроблено експериментальну установку функціонально-мехатронного модуля покрокового переміщення платформи формування структурних елементів транспортного пакету .

- Удосконалено методику проведення експериментальних досліджень з

визначення технічних та технологічних характеристик роботи функціонально-мехатронного модуля покрокового переміщення платформи формування структурних елементів транспортного пакету за різними алгоритмами рекуперації енергії з метою реалізації оптимального за швидкодією закону руху та точністю позиціонування платформи.

- Запропоновано та розроблено експериментальну установку функціонально-мехатронного модуля вакуумного захоплюючого пристрою для тарних вантажів.

- Удосконалено методику проведення експериментальних досліджень з визначення впливу величини вакууму на зусилля утримання тарних вантажів від вакуумних захоплюючих пристроїв за умови змінних їх технічних характеристик.

- Удосконалено методику проведення експериментальних досліджень з визначення зусилля зсуву тарних вантажів відносно вакуумних захоплюючих пристроїв за умови зміни величини вакууму. Оброблені результати експериментального дослідження були використані під час числових розрахунків відповідної математичної моделі.

- Запропоновано та розроблено експериментальну установку для дослідження характеристик роботи функціонально-мехатронного модуля лінійного переміщення тарних вантажів з електромеханічним приводом, які в режимі реального часу реєструвались за допомогою електронних датчиків та фіксувались спеціальним програмним забезпеченням, а їх наочний вигляд представлявся у вигляді графіків.

- Удосконалено методику дослідження тривалості виконання операцій переміщення тарних вантажів у вертикальній та горизонтальній площинах функціонально-мехатронним модулем лінійного переміщення з електромеханічним приводом за умови впливу зовнішніх факторів на режим роботи системи керування.

- Основні результати досліджень, які були виконані на експериментальних установках за методиками, викладеними у даній роботі, опубліковані у наукових працях [308 – 331].

## **РОЗДІЛ 3. МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО ПРОЄКТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-МЕХАТРОННИХ МОДУЛІВ РОБОТОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПАКЕТІВ**

### **3.1 Основні методологічні засади проєктування робототехнічних комплексів на основі функціонально-мехатронних модулів**

На основі аналізу конструкцій робототехнічних комплексів для формування транспортних пакетів та методик їх проєктування встановлено, що більшість з них сформовані на засадах функціонально-модульного принципу побудови. Такий підхід проєктування дає можливість проводити синтез робототехнічних пакетоформувань комплексів з обмеженого набору уніфікованих функціонально-мехатронних модулів, комбінація яких забезпечують найрізноманітніші за технологічними схемами формування транспортного пакету [1, 2].

Основною задачею є поєднання функціонально-мехатронних модулів, що характеризуються раціональними геометричними, кінематичними та іншими технічними параметрами в єдину структуру робототехнічних комплексів для формування транспортних пакетів на основі відповідних зв'язків: матеріальних, енергетичних та інформаційних потоків [45]. Для створення таких структур використовуються відомі методи проєктування, в основі яких здебільшого покладена процедура декомпозицію сумарного технологічного перетворення і створення множини цих перетворень. [107]. Поряд із цим потрібно враховувати, що робототехнічні комплекси для формування транспортних пакетів нового покоління з функцією гнучкості для швидкого переналагоджування потребують нових робочих органів та їх приводів, які ґрунтуються на спільному використанні компонентів різної фізичної природи: механічних, електричних та апаратно-програмних. Таке взаємопроникнення електричної системи в механічну та синергетичну з апаратно-програмним керуванням мехатронних систем робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів потребує удосконалення процесу проєктування. Мехатронний підхід до проєктування нових зразків робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів полягає

створенні органічно-цілісних електро-механо-пневмо-електронних технічних систем [45, 107]. Реалізація мехатронного підходу до проектування нових зразків робототехнічних комплексів для формування транспортних пакетів забезпечується стрімким розвитком функціональних можливостей нових модуль-елементів у поєднанні зі штучним інтелектом.

Недоліком подальшого розвитку мехатронного підходу до проектування нових зразків робототехнічних комплексів для формування транспортних пакетів є відсутність аналітичних залежностей, що пов'язують функціональне призначення модулів зі структурою і характеристиками комплексів в разі використання для їх формування модуль-елементів з новими функціональними можливостями. Для їх створення необхідно розробити послідовність формування робототехнічних комплексів для формування транспортних пакетів з мехатронних модулів на базі критеріїв оцінювання їх ефективності; методики створення функціональних кластерів параметричних та типорозмірних рядів мехатронних модулів для формування транспортного пакету із заданим переліком функціональних властивостей [2, 45].;

За основу методики створення функціональних кластерів параметричних та типорозмірних рядів мехатронних модулів для формування транспортного пакету візьмемо наукове обґрунтування, наведене в роботі [45].

Відповідно до цієї методики конструкцію будь-якого функціонально-мехатронного модуля для формування транспортного пакету модуля ( $M$ ) можна навести у вигляді взаємодії окремих повторювальних ( $E_n$ ) та змінних ( $E_s$ ) модулів-елементів, які за своїми параметрами можуть поєднуватися між собою в межах допустимих відхилень.

$$M = M(E_n, E_s). \quad (3.1)$$

Тоді окремий модуль-елемент функціонального модуля  $E_{i,j}$  описується як сукупність змінних різнофункціональних властивостей із заданою кількістю кінцевих значень [45],

$$E_{i,j} = (X_{i,1}, \dots, X_{i,g}, \dots, X_{i,n})_j, \quad (3.2)$$

де  $g = \overline{1, n}$  - змінна кількість кінцевих значень.

Властивість окремого модуль-елементу ( $X_{i,n}$ ) характеризується технічними та технологічними параметрами:

$$X_{i,j}^{n(i)} = \| d_{i,\gamma,\beta} \|_j. \quad (3.3)$$

Для формування функціонального кластера ( $A_k$ ) однотипних мехатронних модулів для формування транспортного пакету ( $M$ ) використовується скінченне число модуль-елементів із різними технічними та технологічними параметрами, а процес формування відбувається шляхом їх комбінаторного поєднання. Отримана кількість однотипних функціональних мехатронних модулів для формування транспортного пакету має бути не менше за початкову кількість модуль-елементів:

$$M_{i,j}^{A_k} \subset M_{i,j}, \quad (3.4)$$

за умови:

$$\sum_i \sum_j M_{i,j}^{A_k} = M_{i,j}. \quad (3.5)$$

Однак треба врахувати, що в процесі комбінаторного поєднання модуль-елементів може виникнути умова, яка характеризує обмежену функціональність створеного мехатронного модуля. Похибка відхилення технологічних параметрів формування транспортного пакету від заданих критеріїв для створених мехатронних модулів знаходиться в межах:

$$\left[ (d_{\gamma,\beta_{\max}} - d_{\gamma,\beta_{\min}}) / d_{\gamma,\beta_{\text{сер}}} \right] \cdot A_k \leq R. \quad (3.6)$$

Функціональність створених рядів мехатронних модулів для формування транспортного пакету визначається на основі заданих технічних та технологічних критеріїв, які з'являються при взаємодії окремих модуль-елементів між собою:  $d_\gamma$

, де  $\gamma = \overline{1, n}$ , або  $d_{\gamma, \beta}$ , де  $\gamma = \overline{1, n}$ ,  $\beta = \overline{1, n}$  за умови визначення величини схожості, що дає можливість в подальшому відбракувати мехатронні модулі під час сортування.

Передбачається, що структура робототехнічного комплексу для формування транспортного пакету  $L^{(1n)}$  буде складатися з обмеженої множини різнотипних мехатронних модулів за функціональним призначенням :

$$L^{(1n)} = \bigcup_{i=1}^m L_i = \{M \mid M_{1n} \in L_1 \wedge M_{2n} \in L_2 \vee M_{3n} \in L_3 \vee \dots \wedge M_{mn} \in L_m\}. \quad (3.7)$$

Перелік типових функціональних модулів робототехнічних комплексів для формування транспортного пакету з тарних вантажів можна навести відповідно ієрархічної структури (рис. 3.1).

Формування нових зразків робототехнічних комплексів для формування транспортного пакету з тарних вантажів базується на методах комбінаторики різних мехатронних модулів, які утворюють множину готових рішень з  $N$  варіантів, які відрізняються різними структурними схемами однак виконують однакову функцію під час формування транспортного пакету:

$$N = (L^{(1n)}, L^{(2n)}, L^{(3n)}, \dots, L^{(in)}). \quad (3.8)$$

Пошук оптимального розв'язку, тобто такого варіанту компонування робототехнічного комплексу для формування транспортного пакету, який найбільшою мірою задовольняє початкові умови проектування та критерії оптимальності передбачає вирішення задачі синтезу. Для його проведення потрібно визначитись із критеріями оптимізації.



Рис. 3.1 Ієрархічна структура робототехнічного комплексу для формування транспортних пакетів із тарних вантажів: ● - вершини зв'язані «і»; ○ - вершини зв'язані «або»

### 3.2 Морфологічний аналіз структури роботизованих комплексів для формування транспортних пакетів

На основі аналізу структурних схем вітчизняних та закордонних зразків роботизованих комплексів для пакування тарних вантажів розроблено типові функціонально-структурні схеми роботизованих комплексів, що реалізують горизонтальний спосіб формування транспортних пакетів. З аналізу конструкцій такого обладнання їх можна поділити на чотири групи: з рамною чотириколонною, портално-двоколонною, портално-одноколонною та важільною компоновкою (рис. 3.2 – 3.5).

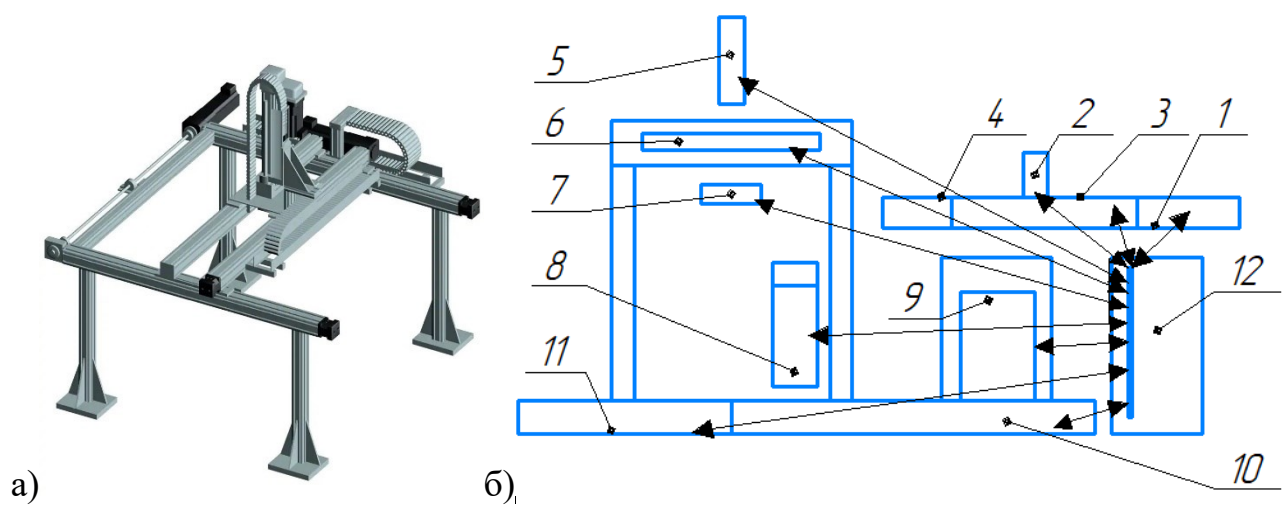


Рис. 3.2. Узагальнена функціонально-структурна схема робототехнічної машини з чотириколонною рамою для формування транспортних пакетів із тарних вантажів: а) загальний вигляд; б) структурна схема робототехнічного комплексу: 1 – конвеєр подачі тарних вантажів; 2 – пристрій орієнтування тарного вантажу; 3 – пристрій зіштовхування тарного вантажу; 4 – конвеєр формування ряду тарних вантажів; 5 – модуль вертикального переміщення ряду/одиночного тарного вантажу; 6 – модуль горизонтального переміщення ряду/одиночного тарного вантажу; 7 – пристрій захоплення; 8 – механізм нанесення на шари вантажів адгезиву; 9 – магазин із піддонами; 10 – конвеєр подачі одиночного піддона до місця формування транспортного пакету; 11 – конвеєр відведення сформованого транспортного пакета; 12 – блок керування.

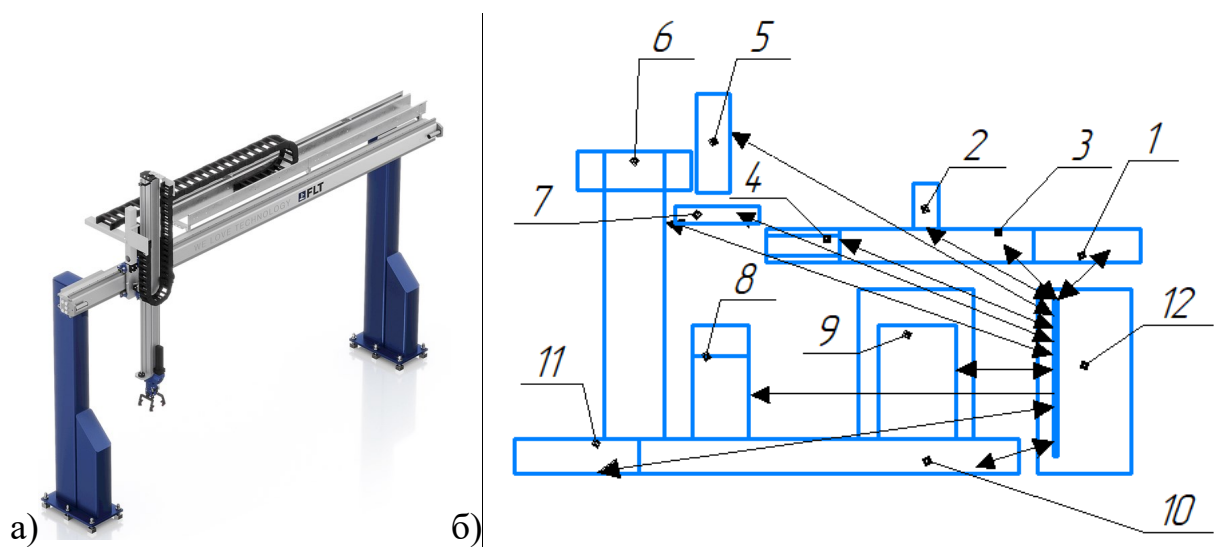


Рис. 3.3 Узагальнена функціонально-структурна схема робототехнічної машини з двоколонною рамою для формування транспортних пакетів із тарних вантажів: а) загальний вигляд; б) структурна схема робототехнічного комплексу: 1 – конвеєр подачі тарних вантажів; 2 – пристрій орієнтування тарного вантажу; 3 – пристрій зіштовхування тарного вантажу; 4 – конвеєр формування ряду тарних вантажів; 5 – модуль вертикального переміщення ряду/одиночного тарного вантажу; 6 – модуль горизонтального переміщення ряду/одиночного тарного вантажу; 7 – пристрій захоплення; 8 – механізм нанесення на шари вантажів адгезиву; 9 – магазин із піддонами; 10 – конвеєр подачі одиночного піддона до місця формування транспортного пакету; 11 – конвеєр відведення сформованого транспортного пакету; 12 – блок керування.

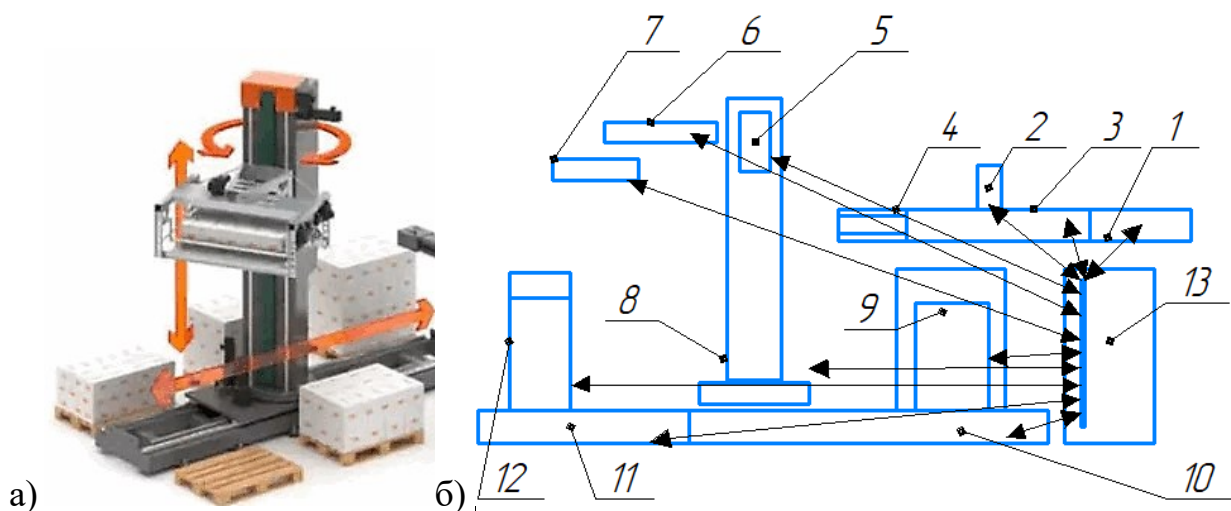


Рис. 3.4 Узагальнена функціонально-структурна схема робототехнічної машини з одноколонною рамою для формування транспортних пакетів із тарних вантажів.

вантажів: а) загальний вигляд; б) структурна схема робототехнічного комплексу: 1 – конвеєр подачі тарних вантажів; 2 – пристрій орієнтування тарного вантажу; 3 – пристрій зіштовхування тарного вантажу; 4 – конвеєр формування ряду тарних вантажів; 5 – модуль вертикального переміщення ряду/одиночного тарного вантажу; 6 – модуль горизонтального переміщення ряду/одиночного тарного вантажу; 7 – пристрій захоплення; 8 – механізм повороту колони; 9 – магазин із піддонами; 10 – конвеєр подачі одиночного піддона до місця формування транспортного пакету; 11 – конвеєр відведення сформованого транспортного пакету; 12 – механізм нанесення на шари вантажів адгезиву; 13 – блок керування.

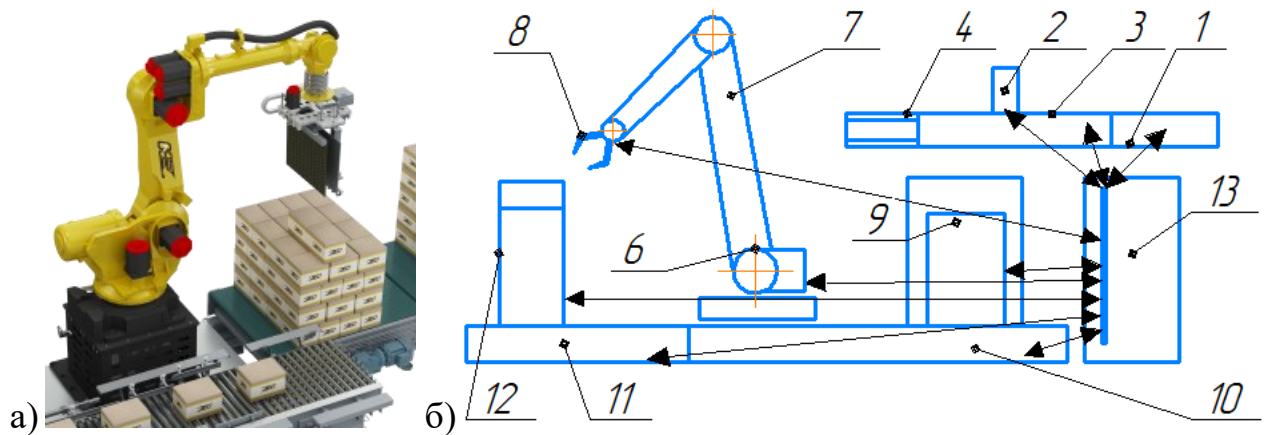


Рис. 3.5 Узагальнена функціонально-структурна схема багатоланкового маніпулятора для формування транспортних пакетів із тарних вантажів: а) загальний вигляд; б) структурна схема робототехнічного комплексу: 1– конвеєр подачі тарних вантажів; 2 – пристрій орієнтування тарного вантажу; 3 – пристрій зіштовхування тарного вантажу; 4 – конвеєр формування ряду тарних вантажів; 5 – механізм повороту станини; 6 – кінематична пара; 7 – рука; 8 – пристрій захоплення; 9 – магазин із піддонами; 10 – конвеєр подачі одиночного піддона до місця формування транспортного пакету; 11 – конвеєр відведення сформованого транспортного пакету; 12 – механізм нанесення на шари вантажів адгезиву; 13 – блок керування.

З аналізу рисунків 3.2, б - 3.5, б можна стверджувати, що структурні схеми роботизованих комплексів формування транспортних пакетів мають обмежений

набір уніфікованих функціональних модулів, а незначна частина з них є типовими для будь-якої конструкції.

Для їх визначення проаналізуємо конструкції вітчизняних та закордонних робототехнічних комплексів (таблиця 3.1.).

За результатами досліджень проведеного морфологічного аналізу встановлено, що типова структурна схема робототехнічного комплексу для формування транспортних пакетів мають обмежений набір уніфікованих функціональних модулів: подачі одиничного тарного вантажу; горизонтального переміщення тарного вантажу або структурного елемента транспортного пакету; вертикального переміщення тарного вантажу або структурного елемента транспортного пакету; подачі одиничного піддону.




Серед конструкцій, найбільш універсальною є рамна чотириколонна компоновка робототехнічної машини.






На чотириколонній рамі можна реалізувати прямолінійне та Г-подібне розташування основних функціональних модулів. Окремою характеристикою компоновки такої робототехнічної машини є можливість змінювати напрямки вхідних та вихідних матеріальних потоків: прямоточні, протилежно направлені та взаємно перпендикулярні.

В розділі 1.2 обґрунтовано доцільність та розкрито переваги впровадження спеціалізованих робототехнічних комплексів для формування транспортних пакетів із харчовими продуктами на основі порталних роботів в порівнянні з маніпуляторами. Тому в подальших наукових дослідженнях використання маніпуляторів важільного типу не розглядалося.

Таблиця 3.1

**Структури робототехнічних комплексів на основі функціонально-мехатронних модулів для формування транспортно-торговельного пакету з тарних вантажів**

N/N	Марка обладнання та найменування виробника	Ілюстрація обладнання	Функціонально-мехатронний модуль							
			Подачі тарного вантажу	Орієнтування тарного вантажу;	Вертикального переміщення тарного вантажу	Горизонтального переміщення тарного вантажу	Захоплення	Подачі одиничного піддона	Нанесення адгезиву	Відведення сформованого транспортного пакету
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	ПСО 700 компанії		+	+	+	+	+	-	-	-
2	PAL 30 компанії «Fipal».		+	-	+	+	+	-	-	+
3	PLS-C 1500 компанія «Mollers»		+	+	+	+	+	+	+	+

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	Gantry Palletizer компанії «MIDC»		+	-	+	+	+	-	-	-
6	Палетайзер компанії «Rothe packtech»		+	-	+	+	+	-	+	+
7	Палетайзер виробництва Alfortec Group		+	+	+	+	+	-	-	-
8	Робот Robostack компанії «Hartness»		+	-	+	+	+	-	-	-
9	1.1.1 Робот Yaskawa компанії «Skladpack»		+	-	+	+	+	+	-	+

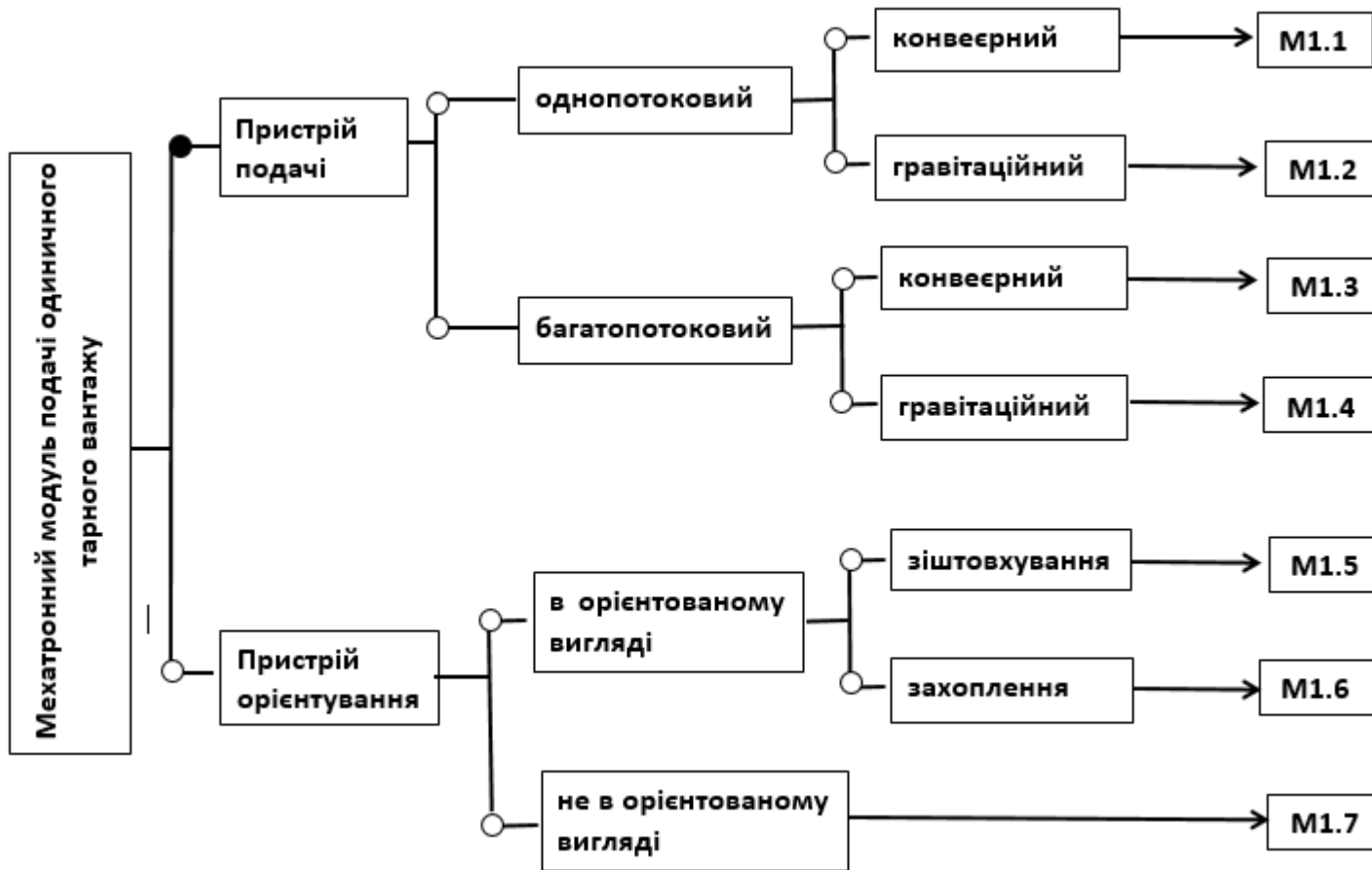


Рис.3.6 Двозначний граф структури модуля подачі одиничного тарного вантажу в робототехнічних комплексах формування транспортного пакету: ● - вершини зв'язані «і»; ○ - вершини зв'язані «або»

### **3.3 Морфологічний аналіз структури мехатронних модулів для формування транспортних пакетів.**

#### **3.3.1 Мехатронний модуль подачі одиничного тарного вантажу**

Мехатронний модуль подачі одиничного тарного вантажу може бути виконаний з верхнім та нижнім розвантаженням, який може включати пристрої: подачі та орієнтування. Пристрій подачі може формувати однопотокову та багатопотокову схему подачі тарних вантажів.

Аналіз мехатронного модуля подачі одиничного тарного вантажу базувався на встановленні функціонально-значущих взаємовідношень між наведеними пристроями.

Структура двозначного графа складається з функціональних логічних функцій «І» та «АБО». Так «І» графом передбачалось, що пристрій подачі є обов'язковим компонентом системи. Графом «АБО» передбачалось, що пристрої орієнтування є додатковими [107].

У результаті аналізу можливих комбінацій пристроїв подачі та орієнтування тарних вантажів отримано масив можливих проектних рішень функціональних мехатронних модулів подачі одиничного тарного вантажу або структурного елемента транспортного пакету, що дало можливість розширити номенклатуру їх модельного ряду до 12 можливих варіантів (таблиця 3.2), які в подальшому можуть бути використані як масив готових конструктивних рішень для вибору оптимальної конструкції за попередньо заданими критеріями конструктора.

Слід зазначити, що найбільш типовою структурною схемою мехатронного модуля переміщення тарного вантажу є варіанти 1 та 7. Варіант 9 є найбільш прийнятною для реалізації багатопотокової подачі одиничних тарних вантажів з харчовими продуктами, і може бути реалізований за рахунок використання конвеєрних систем.

**Морфологічний аналіз мехатронного модуля подачі одиничного тарного вантажу**

	Варіанти конструктивного виконання											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
<b>M<sub>1.1</sub></b>	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>M<sub>1.2</sub></b>	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
<b>M<sub>1.3</sub></b>	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
<b>M<sub>1.4</sub></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
<b>M<sub>1.5</sub></b>	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
<b>M<sub>1.6</sub></b>	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
<b>M<sub>1.7</sub></b>	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1

0-механізм відсутній, 1 - механізм присутній

**3.3.2 Мехатронний модуль горизонтального переміщення тарного вантажу або структурного елемента транспортного пакету**

Мехатронний модуль горизонтального переміщення тарного вантажу або структурного елемента транспортного пакету в робототехнічних комплексах призначений для формування структурного елемента транспортного пакету шляхом горизонтального переміщення каретки з тарним вантажем по напрямній. Найбільш вживаними є два конструктивних виконання напрямних.

До першого конструктивного виконання відносяться циліндричні напрямні, які в типових конструкціях мехатронних модулів горизонтального переміщення використовуються в кількості від двох до чотирьох. До другого конструктивного виконання відносяться призматичні напрямні з трьома або чотирма гранями. Для переміщення каретки по напрямним використовуються підшипники ковзання або кочення з різними видами приводів. До таких приводів відносяться пневматичний, електромеханічний та лінійний привод.

Структура електромеханічного приводу комплектується додатковим набором пристроїв для перетворення обертального руху вала електродвигуна в зворотньо-поступальний рух каретки: зубчастою або плоскопасовою передачею або передачею гвинт-гайка.

Аналіз базувався на встановленні функціонально-значущих взаємовідношень між наведеними конструктивними елементами напрямної для переміщення каретки з тарним вантажем та її привода (рис.3.7). Графами «І» та «АБО» передбачалось комбінування обов'язкових та вибіркових модуль-елементів переміщення каретки та її привода (таблиця 3.3).

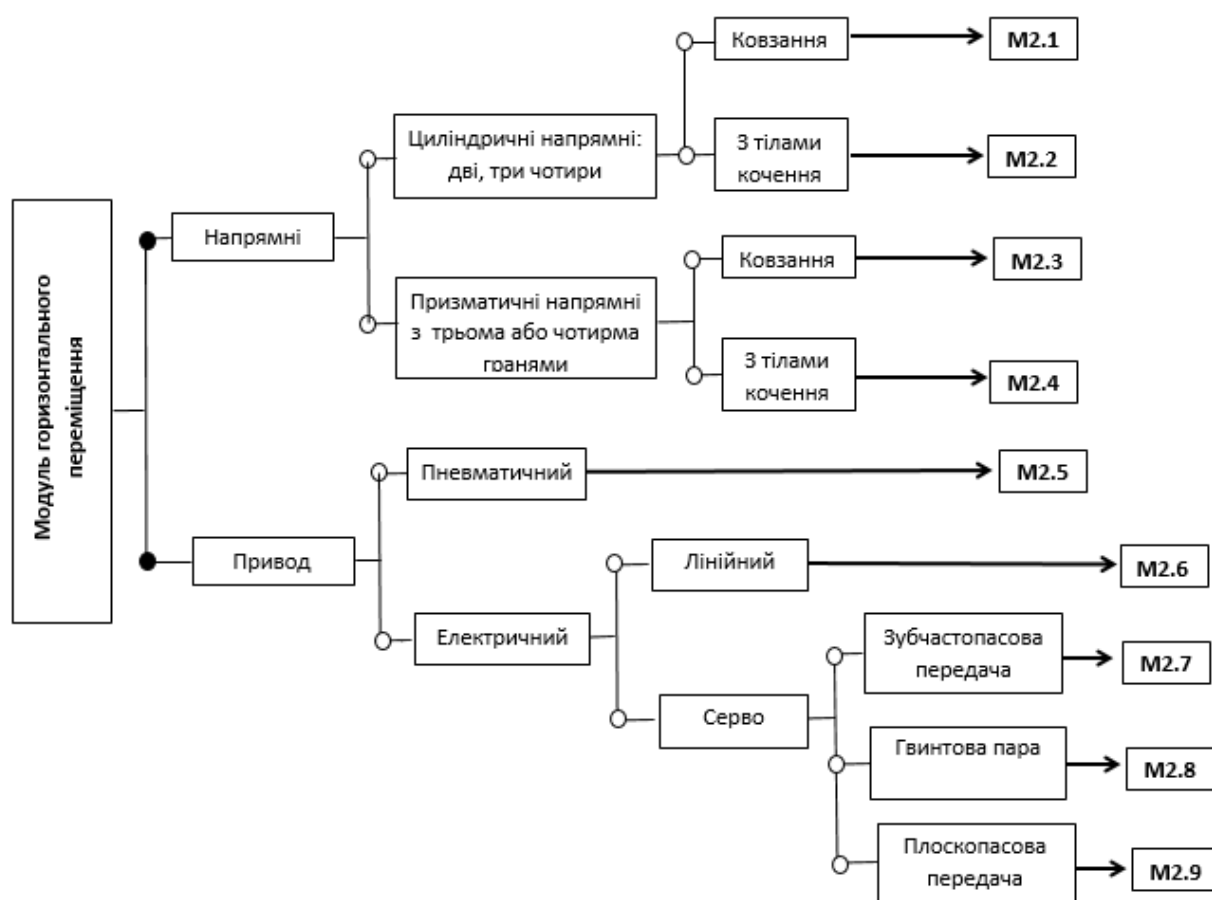


Рис. 3.7 Двозначний граф структури мехатронного модуля горизонтального переміщення тарного вантажу або структурного елементу транспортного пакету в робототехнічних комплексах формування транспортного пакету: ● –вершини зв'язані «і»; ○ – вершини зв'язані «або»

У результаті аналізу отримано масив можливих проектних рішень функціонально-мехатронного модуля горизонтального переміщення тарного

вантажу або структурного елементу транспортного пакету, параметричний ряд яких нараховує 21 можливий варіант.

Найбільш типовою схемою модуля горизонтального переміщення тарного вантажу або структурного елементу транспортного пакету є варіанти 8 та 9. Варіант 8 є найбільш використовуваним для коротких переміщень до 1,5 метра і може бути реалізований за рахунок використання безштокового пневмомеханічного приводу.

Варіант 19 є найбільш типовим для використання електромеханічного приводу з циліндричними напрямними та підшипниками кочення. Основною перевагою такої конструкції є розташування каретки над напрямними, що дає можливість розташовувати модуль захоплення тарного вантажу в горизонтальній площині. Таблиця 3.3 містить варіанти можливих конструктивних рішень функціонально-мехатронного модуля горизонтального переміщення тарного вантажу або структурного елементу транспортного пакету, які можуть бути використані конструктором для вибору оптимальної конструкції за попередньо заданими критеріями ефективності.

### **3.3.3 Мехатронний модуль вертикального переміщення одиничного тарного вантажу.**

Типова структура мехатронного модуля вертикального переміщення одиничного тарного вантажу складається з пристроїв укладання тарного вантажу на піддон і може включати в свою структуру механізми вертикального переміщення: руки та платформи з пневматичним, електромеханічним або лінійним приводами.

Структура електромеханічного приводу комплектується додатковим набором пристроїв для перетворення обертального руху валу електродвигуна в зворотньо-поступальний рух каретки: зубчастою або плоскопасовою передачею або передачею гвинт-гайка. В процесі проведення морфологічного аналізу передбачалося, що конструктивне виконання руки у вигляді переміщення каретки має функцію позиціонування в заданій координаті і не потребує додаткових пристроїв.

Таблиця 3.3

**Морфологічний аналіз мехатронного модуля горизонтального переміщення одиничного тарного вантажу або структурного елемента транспортного пакету**

	Варіанти конструктивного виконання																				
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
<b>M<sub>2.1</sub></b>	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>M<sub>2.2</sub></b>	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>M<sub>2.3</sub></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
<b>M<sub>2.4</sub></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
<b>M<sub>2.5</sub></b>	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<b>M<sub>2.6</sub></b>	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
<b>M<sub>2.7</sub></b>	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
<b>M<sub>2.8</sub></b>	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
<b>M<sub>2.9</sub></b>	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0

0-механізм відсутній, 1 - механізм присутній

А конструктивне виконання руки у вигляді консолі не має функції позиціонування та відповідно потребує додаткових пристроїв вертикального переміщення з функцією позиціонування. Такими пристроями можуть бути пристрої переміщення платформи.

Графом «І» передбачалось, що для формування структурного елементу транспортного пакету пристрій укладання є обов'язковим. Графом «АБО» передбачалось, що пристрої вертикального переміщення платформи з піддоном є додатковими. Аналітичне дослідження базувалось на встановленні функціонально-значущих взаємовідношень між даними пристроями з урахуванням їх конструктивних особливостей. У результаті аналізу отримано масив можливих нових проектних рішень компоновання мехатронних модулів вертикального переміщення для виконання операції укладання тарного вантажу. Багатоваріантність створених структурних схем функціонального ряду мехатронних модулів вертикального переміщення тарного вантажу в процесі їх компоновання наведено у вигляді таблиці, яка нараховує 30 можливих варіантів (таблиця 3.4).

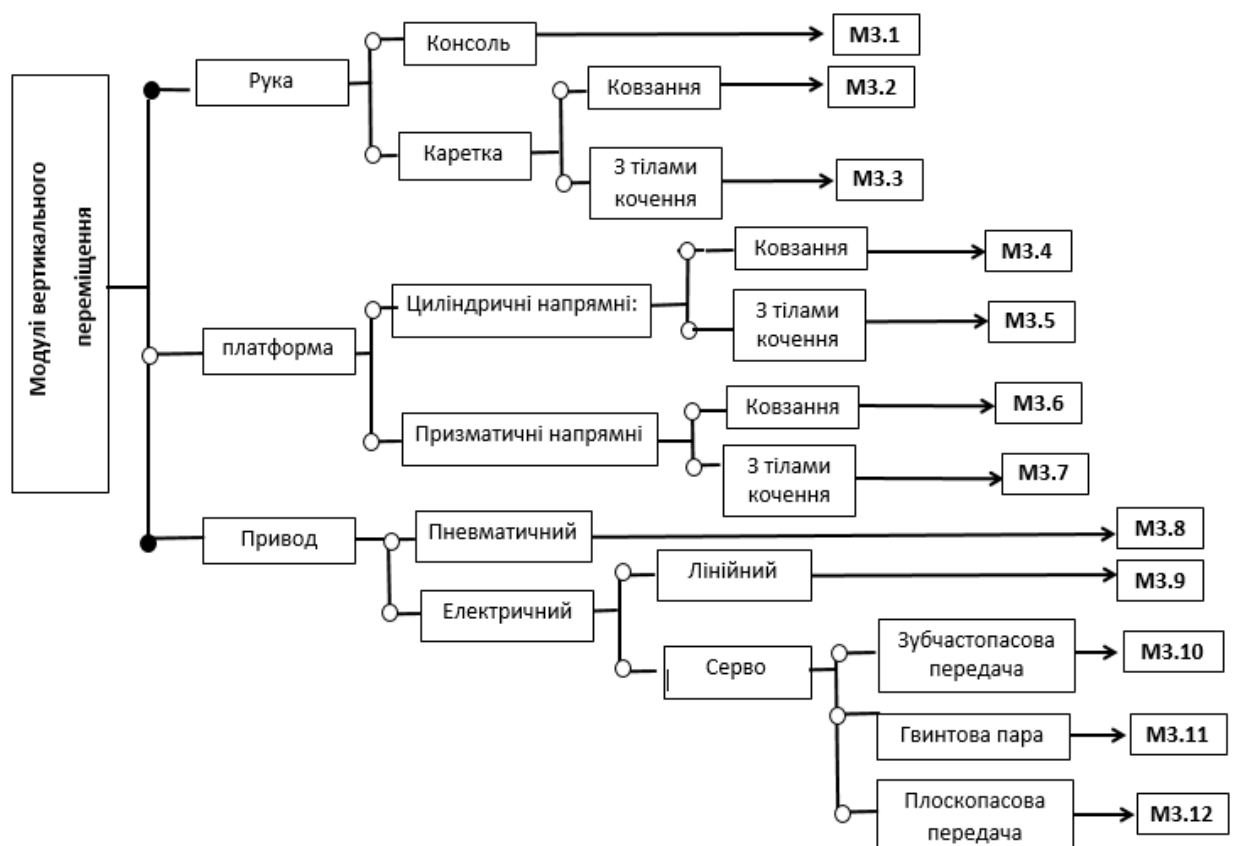


Рис.3.8 Двозначний граф структури мехатронного модуля вертикального переміщення тарного вантажу в робототехнічних комплексах формування транспортного пакету: ● – вершини зв'язані «і»; ○ – вершини зв'язані «або»

Встановлено, що найбільш типовою структурною схемою вертикального переміщення тарного вантажу в робототехнічних комплексах є варіанти 8 та 10, які передбачають позиціонування тарного вантажу на нерухомий піддон та відрізняються видом приводу.

Варіант 20 передбачає позиціонування тарного вантажу на рухому платформу з піддоном та є найбільш перспективним за умови введення функції рекуперації енергії стисненого повітря в пневмоциліндрах, а варіант 18 за умови введення функції рекуперації електричної енергії в електродигунах.

Таблиця 3.4 містить варіанти можливих конструктивних рішень функціонально-мехатронного модуля вертикального переміщення тарного вантажу або структурного елемента транспортного пакету, які можуть бути використані конструктором для вибору оптимальної конструкції за попередньо заданими критеріями ефективності.

### **3.3.4 Мехатронний модуль подачі піддону**

Функціональний модуль подачі піддону складається з двох пристроїв: виділення одиничного піддона із магазину та його переміщення в зону формування транспортного пакету (рис. 3.9).

Пристрій виділення одиничного піддона може включати в свою структуру механізми: зіштовхування, перенесення та їх комбіноване поєднання.

Аналіз базувався на встановленні функціонально-значущих взаємовідношень між наведеними пристроями (таблиця 3.45).

Пристрої виділення одиничного піддона може включати в свою структуру механізми: зіштовхування, перенесення та їх комбіноване поєднання.

**Морфологічний аналіз мехатронного модуля вертикального переміщення одиничного тарного вантажу  
або структурного елемента транспортного пакету**

	Варіанти конструктивного виконання																													
	0 1	0 2	0 3	0 4	0 5	0 6	0 7	0 8	0 9	1 0	1 1	1 2	1 3	1 4	1 5	1 6	1 7	1 8	1 9	2 0	2 1	2 2	2 3	2 4	2 5	2 6	2 7	2 8	2 9	3 0
<b>M<sub>3.1</sub></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>M<sub>3.2</sub></b>	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>M<sub>3.3</sub></b>	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>M<sub>3.4</sub></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>M<sub>3.5</sub></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>M<sub>3.6</sub></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
<b>M<sub>3.7</sub></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
<b>M<sub>3.8</sub></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>M<sub>3.9</sub></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>M<sub>3.7</sub></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>M<sub>3.8</sub></b>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<b>M<sub>3.9</sub></b>	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
<b>M<sub>3.10</sub></b>	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
<b>M<sub>3.11</sub></b>	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
<b>M<sub>3.12</sub></b>	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0



Рис. 3.9 Двозначний граф структури мехатронного модуля подачі одиночного піддону в робототехнічних комплексах формування транспортного пакету:

● – вершини зв’язані «і»; ○ – вершини зв’язані «або»

Встановлено, що найбільш типовою структурною схемою подачі одиночного піддону є варіанти 2 та 5. Варіант 11 передбачає ручну подачу одиночного піддону і може бути реалізований за рахунок використання конвеєрної системи та вилкового навантажувача.

Таблиця 3.5

### Морфологічний аналіз мехатронних модулів подачі одиночного піддону

	Варіанти конструктивного виконання											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
<b>M<sub>4.1</sub></b>	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>M<sub>4.2</sub></b>	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
<b>M<sub>4.3</sub></b>	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
<b>M<sub>4.4</sub></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
<b>M<sub>4.5</sub></b>	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
<b>M<sub>4.6</sub></b>	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
<b>M<sub>4.7</sub></b>	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1

0-механізм відсутній, 1 - механізм присутній

Отримані масиви конструктивного виконання функціонально-мехатронних модулів: подачі одиничного тарного вантажу; горизонтального переміщення тарного вантажу або структурного елемента транспортного пакету; вертикального переміщення тарного вантажу або структурного елемента транспортного пакету; подачі одиничного піддону можна використовувати для створення параметричних рядів конструкцій, що виконують однотипну технологічну операцію. Аналіз характеристик створених конструкцій функціонально-мехатронних модулів та вибір оптимального зразка для компоновки робототехнічного комплексу формування транспортного пакету потребує визначення критеріїв їх ефективності.

Отримані параметричні ряди функціонально-мехатронних модулів в подальшому будемо трансформувати в кластери відповідних функціональних модулів.

### **3.4. Морфологічний синтез структури роботизованих комплексів для формування транспортних пакетів з функціональних мехатронних модулів**

Результатом морфологічного аналізу мехатронних модулів роботизованих комплексів є створення функціональних кластерів в яких формуються параметричні ряди  $M_i$  однотипних функціональних мехатронних модулів з різних модуль-елементів. Поєднання відповідних функціональних мехатронних модулів із різних кластерів між собою забезпечує створення нової компоновки робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів (рис.3.10).

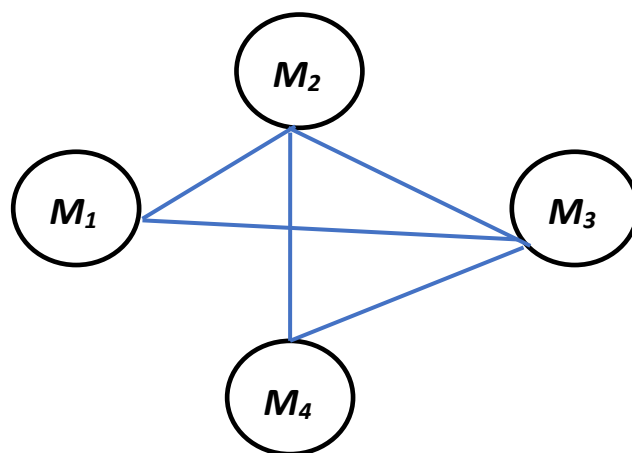


Рис. 3.10 Взаємозв'язок мехатронних модулів в структурі робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів:  $M_1$  – модуль подачі одиничного

тарного вантажу;  $M_2$  – модуль горизонтального переміщення тарного вантажу або структурного елементу транспортного пакету;  $M_3$  – модуль вертикального переміщення тарного вантажу;  $M_4$  – модуль подачі одиничного піддону.

### **3.4.1 Багатокритеріальний синтез структури спеціалізованих робототехнічних комплексів для формування транспортних пакетів**

Метою проведення багатокритеріального синтезу спеціалізованих структур робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів харчових продуктів з мехатронних модулів є порівняльний аналіз оптимальних структурних рішень їх конструкцій, які відповідають заданим критеріям [105 – 108].

За результатами морфологічного аналізу передбачається, що структура спеціалізованого робототехнічного обладнання для пакетування тарних вантажів складається з обмеженої множини різнотипних мехатронних модулів, що розділені на підмножини за функціональним призначенням, а її раціональною конструкцією є порталні роботи. Багатокритеріальний синтез структур спеціалізованих робототехнічних машин для формування транспортних пакетів з тарних вантажів за наведеною методикою показано на прикладі параметричного ряду порталних робіт компаній: Sealing System, «Аквипак», «Fipal», «Mollers», «MIDC», «Rothe packtech», «Alfotec Group», які мають однакову технологічну схему формування транспортного пакету та рамну чотириколонну компоновку.

Для даного етапу дослідження було використано типові показники ефективності робототехнічних комплексів для формування транспортних пакетів із тарних вантажів [1, 2, 45, 107]: фактична продуктивність; функціональна точність; енерговитрати. Методологія визначення перерахованих показників ефективності описана в роботі [45].

Актуальним показником сьогодення спеціалізованих робототехнічних комплексів для формування транспортних пакетів є показник енерговитрат, який залежить від кількості функціонально-мехатронних модулів і визначається з урахуванням споживаної ними потужності:

$$E_i = N_i \cdot T, \quad (3.1)$$

де,  $E_i$  – енергія, витрачена  $i$ -тим мехатронний модулем для виконання однієї технологічної операції за час  $T$ , МДж;  $N_i$  – потужність  $i$ -го мехатронного модуля, Вт;  $T$  – час виконання однієї технологічної операції, с. Тоді для будь-якої структури робототехнічної машини  $X_i = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$  виконується умова:

$$E_{зв} = \sum_{i=1}^n E_i . \quad (3.2)$$

Фактична продуктивність робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів харчових продуктів враховувала час спростовання через переналагодження (час спростовання через несправності не враховувався).

Вагомим показником ефективності спеціалізованих робототехнічних комплексів з мехатронних модулів для формування транспортних пакетів є коефіцієнт точності позиціювання тарного вантажу або структурного елемента транспортного пакету, який визначається через похибку позиціювання для кожної площини переміщень  $\lambda_i = f_i(\Delta x_i, \Delta y_i; \Delta z_i)$ :

$$\Delta x = x_1 - x_0; \Delta y = y_1 - y_0; \Delta z = z_1 - z_0, \quad (3.3)$$

де  $x_1, y_1, z_1$  – фактична координата положення тарного вантажу або структурного елемента транспортного пакету;  $x_0, y_0, z_0$  – програмно задана координата положення тарного вантажу або структурного елемента .

Загальна похибка позиціювання залежить від структури спеціалізованого робототехнічного комплексу:

$$\lambda_{зв} = \sum_{i=1}^n \lambda_i . \quad (3.4)$$

Показники енерговитрат, похибки позиціювання та фактичної продуктивності заданого параметричного ряду робототехнічних комплексів наведено в таблиці 3.6.

Для вирішення задачі оцінки якості структур наведених спеціалізованих портальних роботів щодо перерахованих показників використаємо метод пошуку Парето-ефективних рішень.

Пошук оптимального рішення проводився за критеріями оптимальності: фактична продуктивність; функціональна точність; енерговитрати.

Всі зазначені часткові критерії оптимальності є адаптивними. Наразі утворити з них векторний критерій оптимальності не можливо, так як екстремум кожного з них є різний і прямує до  $\max$  (фактична продуктивність), або до  $\min$  (енерговитрати та похибка позиціонування). Тому виразимо фактичну продуктивність через зменшення часу простою робототехнічних комплексів для формування транспортних пакетів у вигляді коефіцієнта готовності. В такому випадку задача максимізації перетвориться на задачу мінімізації, а векторний критерій оптимальності буде прямувати до  $\min$  значення екстремуму.




Тоді процес пошуку раціонального варіанту конструкції робототехнічного комплексу для формування транспортного пакету зводиться до пошуку мінімального значення критерію оптимальності, який виявиться деяким компромісом для всіх часткових критеріїв в цілому. Всі варіанти структур параметричного ряду робототехнічних комплексів для формування транспортного пакету з показниками відповідних критеріїв оптимальності, отриманих аналітичними дослідженнями наведено в табл. 3.6.





Математичний розрахунок інтегрального критерію оптимальності для параметричного ряду робототехнічних комплексів для формування транспортного пакету передбачає визначення його числових значень: для кожного значення часткових критеріїв оптимальності визначимо вагові коефіцієнти  $C_i$ .

Для цього проведемо порівняльний аналіз отриманих значень похибки позиціонування, готовності та енерговитрат для кожного зразка пакувального обладнання (табл. 3.6) і відповідно здійснимо присвоєння вагових коефіцієнтів за принципом наростання (табл. 3.7).

Таблиця 3.6

**Показники ефективності робототехнічних комплексів на основі функціонально-мехатронних модулів для формування транспортного пакету з тарних вантажів**

N/N	Марка обладнання та найменування виробника	Ілюстрація обладнання	Характеристики показників ефективності						
			Продуктивність Q, шт/хв	Час (Т) циклу, с	Зведена потужність, кВт	Енерговитрати на цикл, МДж	Похибка позиювання, мм	Коефіцієнт готовності, Кг	Фактична продуктивність,, шт/хв
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Х <sup>1</sup>	IGT компанії «Sealing System»		7	7,6	8	60,8	3,5	0,987	6,91
Х <sup>2</sup>	PCO 700 компанії «Аквипак».		5	12	4,9	58,8	2,9	0,983	4,91
Х <sup>3</sup>	PAL 30 компанії «Fipal».		6	10	7	70	4,0	0,988	5,93

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X <sup>4</sup>	PLS-C 1500 компанія «Mollers»		4	15	5,5	82,5	1,5	0,982	3,93
X <sup>5</sup>	Gantry Palletizer компанії «MIDC»		12	5	8.7	43,5	4,70	0,986	11,83
X <sup>6</sup>	Палетайзер компанії «Rothe packtech»		8	7,5	12,7	95,25	5,0	0,981	7,84
X <sup>7</sup>	Палетайзер виробництва Alfotec Group		10	6	6,9	41,4	4,5	0,984	9,84

**Оцінка структур робототехнічних комплексів для формування  
транспортного пакету за ваговими коефіцієнтами**

Критерій	Оцінки варіантів структур пакувальної машини						
	$X^1$	$X^2$	$X^3$	$X^4$	$X^5$	$X^6$	$X^7$
Похибка позиціонування: $\lambda_{зв}$ , мм	3	2	4	1	6	7	5
Коефіцієнт готовності, $K_{ВГ}$	6	3	7	2	5	1	4
Енерговитрати, $E_{зв}$ МДж	4	3	5	6	2	7	1

Підставивши відповідні дані з таблиць, одержимо часткові інтегральні критерії оптимальності для кожної конструкції робототехнічного комплексу для формування транспортних пакетів:

$$F(X^1) = \left(3 \frac{3,5}{1,5}\right) + \left(6 \frac{0,987}{0,981}\right) + \left(4 \frac{60,8}{41,4}\right) = 18,9; \quad F(X^2) = \left(2 \frac{2,9}{1,5}\right) + \left(3 \frac{0,983}{0,981}\right) + \left(3 \frac{58,8}{41,4}\right) = 11,13;$$

$$F(X^3) = \left(4 \frac{4}{1,5}\right) + \left(7 \frac{0,988}{0,981}\right) + \left(5 \frac{70}{41,4}\right) = 24,47; \quad F(X^4) = \left(1 \frac{1,5}{1,5}\right) + \left(2 \frac{0,982}{0,981}\right) + \left(6 \frac{82,5}{41,4}\right) = 14,95;$$

$$F(X^5) = \left(6 \frac{4,7}{1,5}\right) + \left(5 \frac{0,986}{0,981}\right) + \left(2 \frac{43,5}{41,4}\right) = 25,92; \quad F(X^6) = \left(7 \frac{5}{1,5}\right) + \left(1 \frac{0,981}{0,981}\right) + \left(7 \frac{95,25}{41,4}\right) = 40,43;$$

$$F(X^7) = \left(5 \frac{4,5}{1,5}\right) + \left(4 \frac{0,989}{0,981}\right) + \left(1 \frac{41,4}{41,4}\right) = 20,03.$$

Розташування часткових інтегральних критеріїв оптимальності кожного зразка робототехнічного комплексу для формування транспортного пакету відповідно до тип значення екстремуму наведено на рис. 3.11.

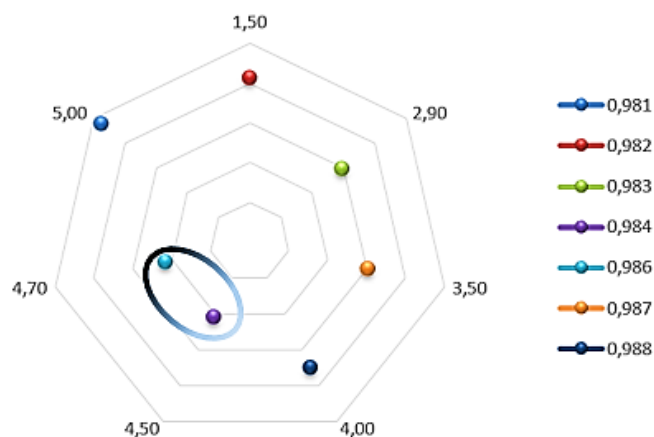


Рис. 3.11. Порівняння оптимальності структур робототехнічних комплексів для формування транспортного пакету за інтегральним критерієм

За результатами розрахунків визначено, що оптимальною структурою робототехнічного комплексу для формування транспортного пакету за вказаними показниками оптимальності можуть бути комплекси за номерами  $X^5$  та  $X^7$ . Подальше дослідження структури спеціалізованих робототехнічних комплексів  $X^5$  та  $X^7$  потребує введення додаткових критеріїв оптимальності, які можуть бути сформовані у відповідності до вимог функціональності визначених мехатронних модулів для формування транспортного пакету.

### 3.4.2 Багатокритеріальний синтез структури функціонально-мехатронних модулів для формування транспортних пакетів

Для визначення основних показників ефективності типових мехатронних модулів робототехнічних комплексів для формування транспортного пакету зроблено опис структур їх кластерів (таблиця 3.5).

Таблиця 3.5

#### Кластери функціональних мехатронних модулів роботизованих комплексів для формування транспортних пакетів

Кластери		Функції мехатронного модуля	
Позначення кластера мехатронних модулів	Найменування кластера мехатронного модуля	Позначення підкластера мехатронного модуля	Опис технологічної операції
$M_1$	Модуль подачі одиничного тарного вантажу	$M_{1.1} - M_{1.4}$	переміщення тарного вантажу по відповідній траєкторії
		$M_{1.5} - M_{1.7}$	орієнтування тарного вантажу
$M_2$	Модуль горизонтального переміщення тарного вантажу або структурного елемента транспортного пакету	$M_{2.1} - M_{2.7}$	формування ряду або шару
$M_3$	Модуль вертикального переміщення	$M_{3.1} - M_{3.4}$	укладання одиничного тарного вантажу

	тарного вантажу або структурного елемента транспортного пакету	$M_{3.6} - M_{3.9}$	укладання структурного елемента транспортного пакету
$M_4$	Модуль подачі одиничного піддону	$M_{4.1} - M_{4.3}$	виділення одиничного піддона
		$M_{4.5} - M_{4.7}$	переміщення піддона в зону формування транспортного пакету

На основі аналізу кластерів функціональних модулів встановлено, що для отриманих альтернатив реалізації функцій  $M_i$  при створенні функціональних кластерів мехатронних модулів необхідно забезпечити вибір альтернативних конструктивних їх виконань на основі оцінок критеріїв  $Kp_i$ . Для вирішення цієї задачі проаналізовано основні вимоги до проектування функціонально-мехатронних модулів кожного кластеру щодо їх технічних, технологічних та функціональних параметрів (табл 3.6).

Таблиця 3.6

**Критерії оцінки функцій мехатронних модулів робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів**

Позначення кластера мехатронного модуля	Технологічна функції	Критерії	
		позначення	Опис критерію оцінювання
$M_1$	$M_{1.1} - M_{1.4}$	$Kp_{101}$	Фактична продуктивність
		$Kp_{102}$	Можливість регулювання швидкості
		$Kp_{103}$	Енерговитрати
		$Kp_{104}$	Зручність обслуговування та налагодження
	$M_{1.5} - M_{1.7}$	$Kp_{111}$	Фактична продуктивність
		$Kp_{112}$	Точність орієнтування положення тарного вантажу

		<i>Kp<sub>113</sub></i>	Енерговитрати
		<i>Kp<sub>114</sub></i>	Зручність обслуговування та налагодження
<i>M<sub>2</sub></i>	<i>M<sub>2.1</sub> – M<sub>2.7</sub></i>	<i>Kp<sub>211</sub></i>	Фактична продуктивність
		<i>Kp<sub>212</sub></i>	Максимальне навантаження
		<i>Kp<sub>213</sub></i>	Швидкість виконання операції
		<i>Kp<sub>214</sub></i>	Можливість швидкого переналагодження
		<i>Kp<sub>215</sub></i>	Точність виконання операції (позиціювання)
		<i>Kp<sub>216</sub></i>	Енерговитрати
		<i>Kp<sub>217</sub></i>	Зручність обслуговування та налагодження
<i>M<sub>3</sub></i>	<i>M<sub>3.1</sub>- M<sub>3.4</sub></i>	<i>Kp<sub>311</sub></i>	Фактична продуктивність
		<i>Kp<sub>312</sub></i>	Максимальне навантаження
		<i>Kp<sub>313</sub></i>	Регулювання швидкості виконання операції
		<i>Kp<sub>314</sub></i>	Можливість швидкого переналагодження
		<i>Kp<sub>315</sub></i>	Точність виконання операції (позиціювання)
		<i>Kp<sub>316</sub></i>	Енерговитрати
		<i>Kp<sub>317</sub></i>	Зручність обслуговування та налагодження
	<i>M<sub>3.6</sub>- M<sub>3.9</sub></i>	<i>Kp<sub>321</sub></i>	Фактична продуктивність
		<i>Kp<sub>322</sub></i>	Максимальне навантаження
		<i>Kp<sub>323</sub></i>	Регулювання швидкості виконання операції

		<i>Kp</i> <sub>324</sub>	Можливість швидкого переналагодження
		<i>Kp</i> <sub>325</sub>	Точність виконання операції (позиціювання)
		<i>Kp</i> <sub>326</sub>	Енерговитрати
		<i>Kp</i> <sub>327</sub>	Зручність обслуговування та налагодження
<i>M</i> <sub>4</sub>	<i>M</i> <sub>4.1- M</sub> <sub>4.4</sub>	<i>Kp</i> <sub>411</sub>	Фактична продуктивність
		<i>Kp</i> <sub>412</sub>	Точність орієнтації положення
		<i>Kp</i> <sub>413</sub>	Енерговитрати
		<i>Kp</i> <sub>414</sub>	Зручність обслуговування та налагодження
	<i>M</i> <sub>4.5- M</sub> <sub>4.7</sub>	<i>Kp</i> <sub>421</sub>	Фактична продуктивність
		<i>Kp</i> <sub>422</sub>	Можливість регулювання швидкості
		<i>Kp</i> <sub>423</sub>	Енерговитрати
		<i>Kp</i> <sub>424</sub>	Зручність обслуговування та налагодження

Аналіз таблиці 3.6 дає можливість встановити, що всі критерії для оцінки функціонально-мехатронного модуля можна умовно поділити на три групи вимог: перша – виконання технічних та експлуатаційних вимог, друга – виконання функціонально-технологічних вимог та третя – виконання економічних вимог. До основних експлуатаційних вимог функціонально-мехатронних модулів сформованих кластерів можна віднести фактичну продуктивність, зручність обслуговування та налагодження.

Основні функціонально-технологічні вимоги сформованих кластерів мехатронних модулів різняться і залежать від виду технологічної операції, наприклад точність позиціювання, регулювання швидкості, тощо. До економічних вимог можна віднести витрати енергії. Критеріїв вибору параметрів

функціонально-мехатронних модулів, мають різний ваговий вплив на результати технічних рішень при створенні робототехнічних комплексів. Тому необхідно провести повний аналіз щодо їх змісту та значень для складових технічного наповнення функціональних кластерів, визначити доцільність застосування кожного критерію та вибрати найбільш суттєві. Поставлену задачу було вирішено методом експертних оцінок.

Експертне оцінювання відбувалося шляхом ранжування – розташування критеріїв у порядку зростання деякої притаманної їм властивості. Результатом проведення ранжування є створення ранжованого ряду критеріїв кожним експертом [107, 142]. Тобто якщо є  $n$  критеріїв, то в результаті їх ранжування  $j$ -им експертом кожен критерій отримує оцінку  $x_{ij}$  – ранг, що приписується  $i$ -му об'єкту  $j$ -им експертом. Значення  $x_{ij}$  знаходяться в інтервалі від 1 до  $n$ . Ранг найважливішого показника дорівнює одиниці, найменш значимого – числу  $n$ .

Обробка результатів експертного оцінювання відбувалася методом середніх арифметичних рангів за наступною послідовністю дій: 1) обчислюється середнє арифметичне рангів, що були присвоєні критеріям:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^m x_j}{m} \quad (3.5)$$

де  $\bar{x}$  – середнє арифметичне оцінок групи експертів;  $x_j$  – оцінка  $j$ -го експерта,  $j = 1 \dots m$ ;  $m$  – кількість експертів.

2) за середніми рангами будується підсумкова ранжований ряд критеріїв, виходячи із принципу – чим меншим є середній ранг, тим кращий критерій.

Для проведення експертних оцінок було задіяно вісім експертів, які на високому професійному рівні володіли знаннями та вміннями в галузі пакування та мали аргументовану думку з досліджуваного явища.

Результати дослідження для кластеру мехатронних модулів подачі одиничного тарного вантажу представлено в таблиці 3.7 (додаток А).

Вагомими критеріями технічної ефективності кластеру мехатронних модулів подачі одиничного тарного вантажу є вимоги до регулювання швидкості переміщення тарного вантажу та точності орієнтування його положення.

Результати дослідження для кластеру мехатронних модулів горизонтального переміщення тарного вантажу або структурного елемента транспортного пакету представлено в таблиці 3.8 (додаток А). Вагомими критеріями технічної ефективності кластеру мехатронних модулів горизонтального переміщення тарного вантажу або структурного елемента транспортного пакету є реалізація максимального навантаження, точності позиціонування тарного вантажу або структурного елемента транспортного пакету, можливість регулювання швидкості переміщення.

Результати дослідження для кластеру мехатронних модулів вертикального переміщення тарного вантажу або структурного елемента транспортного пакету представлено в таблиці 3.9 (додаток А). Вагомими критеріями технічної ефективності кластеру мехатронних модулів вертикального переміщення тарного вантажу або структурного елемента транспортного пакету є точність позиціонування тарного вантажу або структурного елемента транспортного пакету; енергозатрати; можливість швидкого переналагодження.

Результати дослідження для кластеру мехатронних модулів подачі одиничного піддону представлено в таблиці 3.10 (додаток А). Вагомими критеріями технічної ефективності кластеру мехатронних модулів подачі одиничного піддону – можливість регулювання швидкості виконання технологічної операції та точність позиціонування піддону.

Таким чином можна виділити п'ять вагомих критеріїв для визначення ефективності конструкції функціонально-мехатронних модулів для формування транспортного пакету:  $K_1$  – максимальне навантаження;  $K_2$  – регулювання швидкості;  $K_3$  – точність реалізації позиціонування робочих ланок;  $K_4$  – енергозатрати на виконання основної функції;  $K_5$  – можливість швидкого переналагодження.

Послідовність методики альтернативного вибору кращого зразка функціонально-мехатронного модуля за визначеними критеріями розглянемо на прикладі кластера горизонтального ( $M_2$ ) та вертикального ( $M_3$ ) переміщення тарного вантажу або структурних елементів транспортного пакету. Передбачимо, що параметричні ряди мехатронних модулів в кластерах горизонтального ( $M_2$ ) та вертикального ( $M_3$ ) переміщення за умови різних видів приводів містять по шість типових зразків (таблиця 3.11).

Таблиця 3.11

**Приводи функціонально-мехатронних модулів кластерів  $M_2$  та  $M_3$**

Кластери функціонально-мехатронних модулів	Тип привода					
	Пневматичний базовий	Серво-пневматика	Лінійний	Електричний сервопривод з пасовою передачею	Електричний сервопривод з передачею гвинт-гайка.	
	Шифр мехатронного модуля в структурі кластера					
Мехатронні модулі вертикального переміщення П	П1	П2	П3	П4	П5	П6
Мехатронні модулі горизонтального переміщення Р	Р1	Р2	Р3	Р4	Р5	Р6

На першому етапі дослідження визначено пріоритет окремого критерію в комплексному критерії ефективності. Для цього був застосований метод експертних оцінок. Результати аналітичного дослідження оброблялися методом середніх арифметичних рангів. Передбачалося, що вагомість кожного критерію для конструкцій сформованих параметричних рядів функціонально-мехатронних модулів визначалися експертом на основі вимог технічного завдання до характеристик формування транспортного пакету, а комплексний критерій ефективності за допомогою метода розстановки пріоритетів. Наприклад, відповідно до вимог технічного завдання по виконанню технологічної операції

переміщення тарного вантажу в вертикальній площині по критерію  $K_1$  (максимальне навантаження функціонального модуля) значення абсолютних пріоритетів наведені в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12

**Квадратична матриця суміжності для оцінювання абсолютних пріоритетів параметричного ряду мехатронних модулів вертикального переміщення для критерію  $K_1$**

Мехатронний модуль з різним видом привода	П1	П2	П3	П4	П5	П6	$\sum_{\text{стр}}$	$\beta^a$ ( $K_1$ )
П1	2	3	3	3	3	3	17	0,236
П2	1	2	2	2	2	2	11	0,155
П3	1	2	2	2	2	3	12	0,166
П4	1	2	2	2	2	3	12	0,166
П5	1	2	2	2	2	3	12	0,166
П6	1	2	1	1	1	2	8	0,111
$\Sigma$							72	1,0

Результати порівняльного оцінювання конструкцій параметричного ряду мехатронних модулів вертикального переміщення тарного вантажу з різним видом приводів для кластеру  $M_3$  по критеріям:  $K_2$  – максимальна швидкість;  $K_3$  – точність реалізації позиціонування робочих ланок;  $K_4$  – енергозатрати на виконання основної функції;  $K_5$  – можливість швидкого переналагодження. Результати аналітичного дослідження відносних пріоритетів наведені в таблиці 3.13.

Результати порівняльного оцінювання конструкцій мехатронних модулів вертикального переміщення тарного вантажу з різним видом приводів щодо відносних пріоритетів заданих критеріїв зведено до 3D графіка (рис. 3.12)

**Результати порівняльного оцінювання конструкцій мехатронних модулів вертикального переміщення з різним видом привода в кластері  $M_3$**

Мехатронний модуль з різним видом привода	Відносні пріоритети конструкцій мехатронних модулів по визначеним критеріям				
	$\beta^a$ (K <sub>1</sub> )	$\beta^a$ (K <sub>2</sub> )	$\beta^a$ (K <sub>3</sub> )	$\beta^a$ (K <sub>4</sub> )	$\beta^a$ (K <sub>5</sub> )
П1	0,236	0,123	0,146	0,196	0,122
П2	0,155	0,136	0,104	0,086	0,161
П3	0,166	0,235	0,252	0,186	0,191
П4	0,166	0,164	0,229	0,140	0,178
П5	0,166	0,164	0,101	0,196	0,179
П6	0,111	0,178	0,168	0,196	0,169

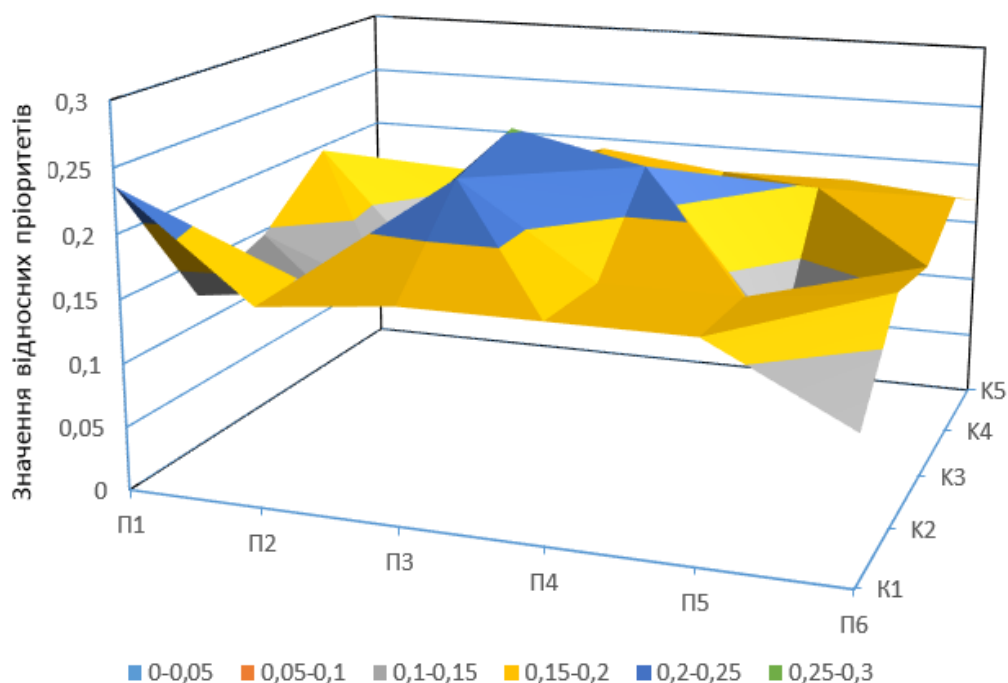


Рис. 3.12 Графік критеріальної оцінки ( $K_1$  – максимальне навантаження;  $K_2$  – максимальна швидкість;  $K_3$  – точність реалізації позиціювання робочих ланок;  $K_4$  – енергозатрати на виконання основної функції;  $K_5$  – можливість швидкого

переналагодження) функціонально-мехатронних модулів вертикального переміщення тарного вантажу з різним видом привода (  $\Pi_1$  –пневматичний;  $\Pi_2$  – електричний сервопривод;  $\Pi_3$  – лінійний привод;  $\Pi_4$  ,  $\Pi_5$  – електричний сервопривод з пристроями перетворення обертального руху з зубчатою та плоско пасовою передачею відповідно;  $\Pi_6$  – електричний сервопривод з пристроями перетворення обертального руху з передачею гвинт-гайка) кластеру  $M_3$  .

Результати порівняльного оцінювання конструкцій функціонально-мехатронних модулів горизонтального переміщення кластеру  $M_2$  по критеріям:  $K_1$  – максимальне навантаження;  $K_2$  – максимальна швидкість;  $K_3$  – точність реалізації позиціонування робочих ланок;  $K_4$  – енергозатрати на виконання основної функції;  $K_5$  – можливість швидкого переналаштування з урахуванням їх вагомості наведені в таблиці 3.14.

Таблиця 3.14

**Результати порівняльного оцінювання конструкцій мехатронних модулів горизонтального переміщення з різним видом привода в кластері  $M_2$**

Мехатронний модуль з різним видом привода	Відносні пріоритети конструкцій мехатронних модулів по визначеним критеріям				
	$\beta^a$ (K1)	$\beta^a$ (K2)	$\beta^a$ (K3)	$\beta^a$ (K4)	$\beta^a$ (K5)
P1	0,156	0,193	0,146	0,221	0,097
P2	0,155	0,186	0,145	0,177	0,125
P3	0,166	0,135	0,196	0,172	0,208
P4	0,166	0,154	0,168	0,139	0,181
P5	0,157	0,164	0,167	0,139	0,181
P6	0,200	0,177	0,178	0,156	0,208

Результати порівняльного оцінювання конструкцій мехатронних модулів горизонтального переміщення тарного вантажу з різним видом приводів щодо відносних пріоритетів заданих критеріїв зведено до 3D графіка (рис. 3.13.).

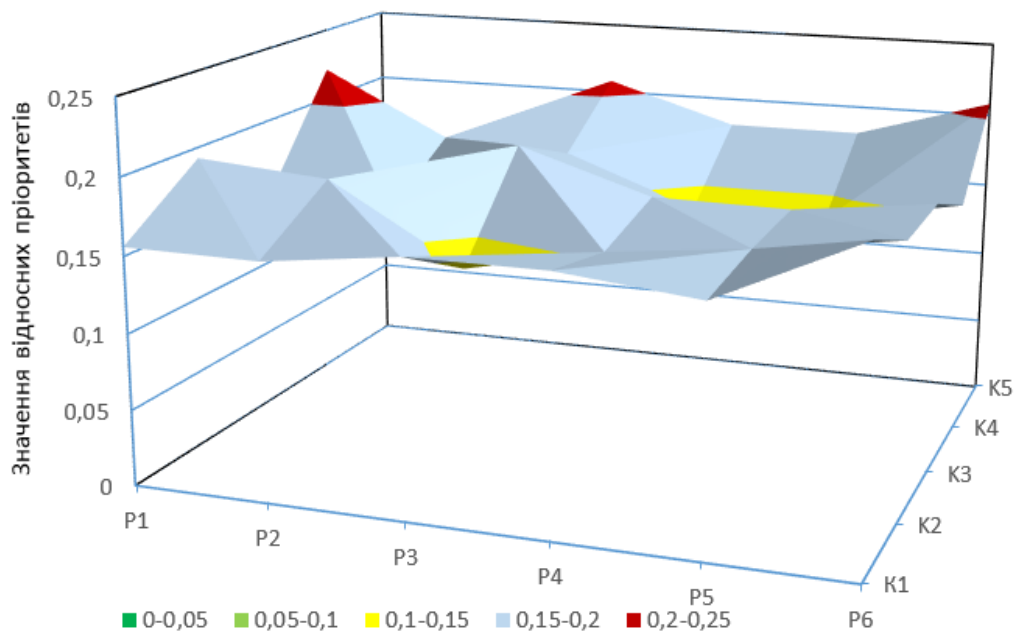


Рис. 3.13. Графік критеріальної оцінки ( $K_1$  – максимальне навантаження;  $K_2$  – максимальна швидкість;  $K_3$  – точність реалізації позиціонування робочих ланок;  $K_4$  – енергозатрати на виконання основної функції;  $K_5$  – можливість швидкого переналагодження) функціонально-мехатронних модулів горизонтального переміщення тарного вантажу з різним видом привода ( $P_1$  – базовий пневматичний;  $P_2$  – електричний сервопривод;  $P_3$  – лінійний привод;  $P_4, P_5$  – електричний сервопривод з пристроями перетворення обертального руху з зубчатою та плоско пасовою передачею відповідно;  $P_6$  – електричний сервопривод з пристроями перетворення обертального руху з передачею гвинт-гайка).

Таким чином за попередньо визначеними критеріями було виконано порівняльне оцінювання конструкцій функціонально-мехатронних модулів з різним видом привода для горизонтального та вертикального переміщення тарного вантажу в кластерах  $M_2$  та  $M_3$ .

Наступним етапом дослідження є пошук кращого варіанту конструкції функціонально-мехатронного модуля зі створеного параметричного ряду шляхом розв’язування задачі оптимізації. Для цього визначимо характеристики зміни відносних пріоритетів критеріїв для створених кластерів.

Передбачається, що зміни відносних пріоритетів критеріїв для конструкцій функціонально-мехатронних модулів вертикального переміщення в створеному параметричному ряді буде визначатися експертами на основі вимог технічного завдання.

Так для кластеру (  $M_3$  ) вертикального переміщення тарного вантажу результати експертної оцінки представлено матрицею відносних пріоритетів критеріїв (табл. 3.15).

Таблиця 3.15

**Характеристики відносних пріоритетів критеріїв для кластеру мехатронних модулів вертикального переміщення тарного вантажу**

Варіант конструктивного виконання	K1	K2	K3	K4	K5	$\sum_{\text{стр}}$	Характеристика відносного пріоритету
K1	2	2	1	3	2	10	0,192
K2	2	2	3	3	3	13	0,250
K3	3	3	2	3	3	14	0,269
K4	1	1	1	2	2	7	0,136
K5	2	1	1	2	2	8	0,154
$\Sigma$						52	1,0

Визначимо величини значущості отриманих коефіцієнтів, як суму доданків вагомості або пріоритетності критеріїв на відповідні значущості характеристики конструкцій мехатронних модулів відносно цих критеріїв. Коефіцієнт значущості конструкції мехатронного модуля вертикального переміщення з базовим пневматичним приводом ( $\Pi_l$ ) визначаємо як:

$$R_{A_1} = \sum_{j=1}^N \beta_j^k \beta_i^a (K_j)$$

Коефіцієнти значущості конструкцій параметричного ряду створених мехатронних модулів вертикального переміщення наведені в таблиці 3.16.

**Величини коефіцієнтів значущості для кластеру мехатронних модулів вертикального переміщення**

Код структури конструкції	$\Pi_1$	$\Pi_2$	$\Pi_3$	$\Pi_4$	$\Pi_5$	$\Pi_6$
Характеристика коефіцієнта значущості $R_{\Pi 1}$	0,161	0,128	0,203	0,181	0,154	0,164

За наведеною методикою обчислюємо коефіцієнти значущості конструкцій параметричного ряду створених мехатронних модулів горизонтального переміщення (табл. 3.17).

**Величини коефіцієнтів значущості для кластеру мехатронних модулів горизонтального переміщення**

Код структури конструкції	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$
Характеристика коефіцієнта значущості $R_{Pn}$	0,162	0,159	0,174	0,162	0,163	0,144

Для пошуку оптимальних варіантів конструкцій функціонально-мехатронних модулів вертикального та горизонтального переміщення за вказаними критеріями оптимальності використаємо метод Парето [45, 105 – 108, 142]. Одним із варіантів вирішення задачі є побудова діаграми Парето. Діаграма Парето будується у вигляді стовпчикowego графіка і показує в спадному порядку відносний вплив кожного критерія на загальну проблему. Крім того, на діаграмі зазвичай приводять кумулятивну криву накопиченого відсотка причин. Діаграма Парето для кластеру мехатронних модулів вертикального переміщення показана на рис.3.14.



Рис. 3.14 Діаграма Парето для вибору оптимального варіанту конструкції мехатронного модуля з кластеру вертикального переміщення за вказаними критеріями:  $K_1$  – максимальне навантаження;  $K_2$  – максимальна швидкість;  $K_3$  – точність реалізації позиціювання робочих ланок;  $K_4$  – енергозатрати на виконання основної функції;  $K_5$  – можливість швидкого переналадження.

За результатами аналізу діаграми Парето можна зробити висновок, що пошукова множина отриманих рішень з кластеру ( $M_3$ ) мехатронних модулів вертикального переміщення по заданих коефіцієнтах значущості  $K_i$ , яка базуються на заданих пріоритетах між вибраними критеріями знаходиться в межах чотирьох типів функціональних модулів.

Методика послідовності вибору передбачає, що на першому етапі розглядаються конструкції мехатронних модулів з лінійним приводом; на другому – конструкції мехатронних модулів з електричним сервоприводом поступального руху робочого органу з зубчастою пасовою передачею; на третьому – розглядаються конструкції мехатронних модулів з електричним сервоприводом поступального руху робочого органу з передачею гвинт-гайка; на четвертому – розглядаються конструкції мехатронних модулів з пневматичним приводом.

Діаграма Парето для кластеру ( $M_2$ ) мехатронних модулів горизонтального переміщення показана на рис.3.15.



Рис. 3.15 Діаграма Парето вибору оптимального варіанту конструкції мехатронного модуля з кластеру горизонтального переміщення за вказаними критеріями:  $K_1$  – максимальне навантаження;  $K_2$  – максимальна швидкість;  $K_3$  – точність реалізації позиціювання робочих ланок;  $K_4$  – енергозатрати на виконання основної функції;  $K_5$  – можливість швидкого переналадження.

За результатами аналізу діаграми Парето для кластеру ( $M_2$ ) мехатронних модулів горизонтального переміщення можна зробити висновок, що пошукова множина отриманих рішень по заданим коефіцієнтам значущості, які базуються на заданих пріоритетах між вибраними критеріями  $K_i$  знаходиться в межах п'яти конструкцій мехатронних модулів, які крім конструктивних особливостей різняться різними видами приводів.

Методика послідовності вибору їх конструкцій передбачає, що на першому етапі розглядаються конструкції мехатронних модулів з електричним сервоприводом з передачею гвинт-гайка; на другому – конструкції мехатронних модулів з лінійним приводом; на третьому – конструкції мехатронних модулів з електричним сервоприводом поступального руху робочого органу з зубчастою пасовою передачею тощо.

### Висновки до розділу III.

- Розроблено методологічний підхід до проектування робототехнічних комплексів формування збільшених вантажних одиниць із харчовими продуктами

на основі функціонально-мехатронних модулів, що виконують максимальну кількість корисних функцій та відповідають регламентованим значенням критеріїв технічної ефективності

- На основі морфологічного аналізу встановлено типову структурну схему спеціалізованого робототехнічного комплексу для формування транспортних пакетів на основі обмеженого набору уніфікованих функціонально-мехатронних модулів: подачі одиничного тарного вантажу; горизонтального переміщення тарного вантажу або структурного елемента транспортного пакету; вертикального переміщення тарного вантажу або структурного елемента транспортного пакету; подачі одиничного піддону.

- На основі морфологічного синтезу встановлено вагомні параметри та критерії технічної ефективності для робототехнічного комплексу формування транспортних пакетів з тарних вантажів: максимальне навантаження; максимальна швидкість; точність реалізації позиціювання робочих ланок; енергозатрати на виконання основної функції; можливість швидкого переналагодження.

- На основі морфологічного синтезу встановлено вагомні критерії технічної ефективності для типових функціональних мехатронних модулів формування транспортних пакетів: *подачі одиничного тарного вантажу* – регулювання швидкості переміщення та точності орієнтування його положення; *горизонтального переміщення тарного вантажу* – реалізація максимального навантаження, точності позиціювання та можливість регулювання швидкості переміщення; *вертикального переміщення тарного вантажу* – точність позиціювання, енергозатрати та можливість швидкого переналагодження; *подачі одиничного піддону* – можливість регулювання швидкості виконання технологічної операції та точність позиціювання піддону.

- Виконано оцінку ефективності структури функціонально-мехатронних модулів робототехнічних комплексів формування транспортного пакету шляхом проведення синтезу допустимих варіантів їх компоувань із створених параметричних рядів;

- На основі морфологічного синтезу встановлено, що пошукова множина

функціонально-мехатронних модулів з різним видом привода для вертикального переміщення тарного вантажу з урахуванням коефіцієнтів значущості, які базуються на заданих пріоритетах між вибраними критеріями знаходиться в межах аналізу чотирьох типів функціональних модулів.

- На основі морфологічного синтезу встановлено, що пошукова множина функціонально-мехатронних модулів з різним видом привода для горизонтального переміщення тарного вантажу з урахуванням коефіцієнтів значущості, які базуються на заданих пріоритетах між вибраними критеріями знаходиться в межах аналізу п'яти типів функціональних модулів

## **РОЗДІЛ 4. ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МЕХАТРОННИХ МОДУЛІВ РОБОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ФОРМУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПАКЕТІВ.**

### **4.1 Аналіз витрати енергії на формування транспортного пакету в робототехнічних комплексах.**

Зменшення енергетичної складової на створення транспортного пакету є важливою задачею по удосконаленню конструкцій функціональних мехатронних модулів з метою створення спеціалізованих робототехнічних комплексів.

Відомо [2, 112, 114 – 117], що величина енергії на формування одного транспортного пакету складається з суми енергій робочого циклу - переміщення зведеної маси тарних вантажів та пристрою захоплювання в горизонтальній і вертикальній площинах та енергії на величину холостого ходу – повернення зведеної маси пристрою захоплювання в початковий стан. З аналізу технологічних схем формування транспортного пакету (підрозділ 1.2) та наукових робіт [1, 2, 116] встановлено, що кількість витраченої енергії на процес пакетування буде залежати від структурної схеми формування шарів, тобто від траєкторії переміщення тарних вантажів. Запропоновано наступні показники для оцінки енергетичної ефективності формування транспортного пакету: 1) показник витрати енергії для переміщення пристрою захоплювання з тарним вантажем у вертикальній площині; 2) показник витрати енергії для переміщення пристрою захоплювання з тарним вантажем у горизонтальній площині; 3) показник витрати енергії для переміщення пристрою захоплювання без вантажу у вертикальній площині; 4) показник витрати енергії для переміщення пристрою захоплювання без вантажу в горизонтальній площині.

Схема технологічного процесу переміщення тарних вантажів порталним роботом у випадку нерухомого піддону має вигляд рис. 4.1. В типових конструкціях робототехнічних комплексів, тарний вантаж захоплюється в точці  $A$  і переміщується в кінцеве положення по вертикальних  $A_z$  та горизонтальних  $A_x$  траєкторіях. Формування транспортного пакету за такою схемою відбувається

пошарно та передбачає зміну кінцевої координати вертикального (Y) та горизонтального (X) переміщення пристрою захоплювання з тарним вантажем.

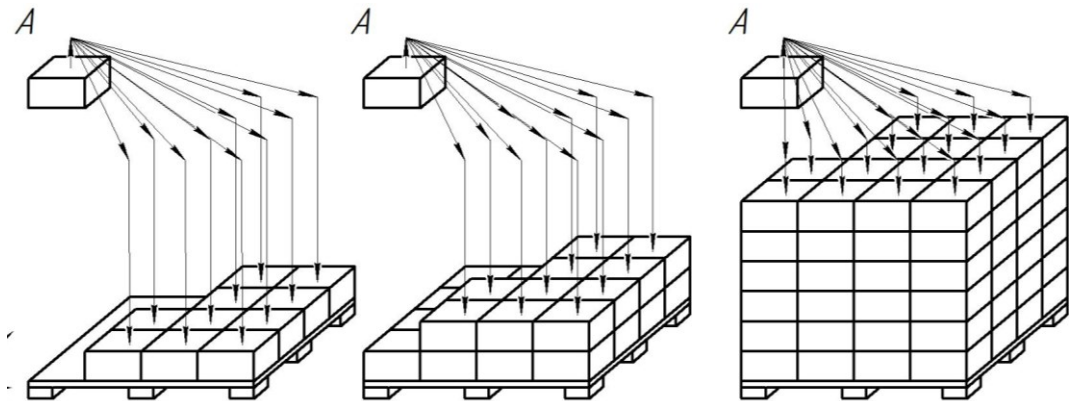


Рис. 4.1. Типова схема побудови технологічного процесу пакування порталним роботом при нерухомому піддоні.

Сумарна енергія на формування транспортного пакету за такою технологічною схемою складається з роботи, витраченої на вертикальне та на горизонтальне переміщення пристрою захоплювання та тарних вантажів:

$$E = A_y + A_x . \quad (4.1)$$

Робота, що здійснюється при вертикальному переміщенні пристрою захоплювання з тарним вантажем

$$A_y = \frac{A'_{yв} + A_{yв} + A_{yз} + A'_{yз}}{\eta} , \quad (4.2)$$

де  $A'_{yв}$  – робота витрачена на піднімання пристрою захоплювання з тарними вантажами в місці захоплення;  $A_{yв}$  – робота, що здійснюється при опусканні пристрою захоплювання з тарними вантажами в зоні формування транспортного пакету;  $A_{yз}$  – робота, що здійснюється при підніманні порожнього пристрою захоплювання в зоні формування транспортного пакету;  $A'_{yз}$  – робота витрачена на опускання порожнього пристрою захоплювання в місці захоплення;  $\eta$  – ККД порталного маніпулятора. Робота, що здійснюється при опусканні пристрою захоплювання з тарними вантажами визначається:

$$A_{y_6} = (m_3 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i + y'_i) + \sum_{i=1}^n m_i \cdot (y_i + y'_i)) \cdot g , \quad (4.3)$$

де  $m_3$  – зведена маса пристрою захоплювання та рухомих частин приводу;  $m_i$  – маса  $i$ -го тарного вантажу,  $n$  – кількість тарних вантажів в пакеті;  $y'_i$  – вертикальне переміщення  $i$ -то тарного вантажу в місці захоплення;  $y_i$  – вертикальне переміщення  $i$ -то тарного вантажу в зоні формування транспортного пакету.

Робота, що витрачається на піднімання пристрою захоплювання, без тарних вантажів:

$$A_{y_3} = m_3 g \sum_{i=1}^n (y_i + y'_i) . \quad (4.4)$$

З аналізу типових технологічних схем пакетування зведена маса кожного тарного вантажу є однаковою. Дану умову приймемо в подальших розрахунках. Тоді, підставляючи вираз (4.3) та (4.4) в рівняння (4.2) визначимо сумарну роботу на піднімання та опускання:

$$A_y = \frac{g \cdot (2m_3 + m_i) \sum_{i=1}^n (y_i + y'_i)}{\eta} , \quad (4.5)$$

Робота, що здійснюється портальним маніпулятором при горизонтальному переміщенні визначається рівнянням:

$$A_x = A_{x_6} + A_{x_3} , \quad (4.6)$$

де  $A_{x_6}$  – робота при переміщенні пристрою захоплювання з тарними вантажами в зону формування транспортного пакету;  $A_{x_3}$  – робота, що витрачається при поверненні порожнього пристрою захоплювання в місце захоплення.

Робота, що здійснюється маніпулятором при горизонтальному переміщенні пристрою захоплюючого з тарним вантажем зону формування транспортного пакету:

$$A_{x_6} = kg \sum_{i=1}^n (m_3 + m_i) x_i , \quad (4.7)$$

де  $x_i$  – горизонтальне переміщення  $i$ -го тарного вантажу в зону формування транспортного пакету;  $k$  – коефіцієнт тертя;  $m_i$  – маса  $i$ -го тарного вантажу.

Робота, що здійснюється маніпулятором при горизонтальному поверненні порожнього пристрою захоплюючого в місце захоплення

$$A_{x3} = k g m_3 \sum_{i=1}^n x_i \quad . \quad (4.8)$$

Відповідно, сумарна робота при горизонтальному переміщенні

$$A_x = k(2m_3 + m_i)g \sum_{i=1}^n x_i \quad . \quad (4.9)$$

Підставляючи вирази (4.9) та (4.5) в рівняння (4.1) отримуємо загальну кількість енергії на формування одного транспортного пакету:

$$E = (2m_3 + m_i)g \left( k \sum_{i=1}^n x_i \frac{1}{\eta} \sum_{i=1}^n (y_i + y'_i) \right) \quad . \quad (4.10)$$

Приклад розрахунку енергетичних витрат на формування транспортного пакету за наведеною методикою портальним роботом за схемою (рис. 4.1) наведено при початкових умовах: кількість шарів в транспортному пакеті – 7; кількість упаковок в шарі – 5, маса тарного вантажу – 25 кг; маса пристрою захоплювання – 6 кг. Вертикальне переміщення  $i$ -го тарного вантажу в місці захоплення – 0,2 м;

$$\sum_{i=1}^n y'_i = 7 \cdot 5 \cdot 0.2 = 7 \text{ м} \quad .$$

Вертикальне переміщення  $i$ -го тарного вантажу в зоні формування транспортного пакету залежить від величини переміщення від 1.4 м до 0,2 м з кроком 0.2м:

$$\sum_{i=1}^n y_i = 5 \cdot (1.4 + 1.2 + 1 + 0.8 + 0.6 + 0.4 + 0.2) = 28 \text{ м} \quad .$$

Сумарне переміщення пристрою захоплювання у вертикальній площині:

$$\sum_{i=1}^n (y_i + y'_i) = 28 + 7 = 35 \text{ м} \quad .$$

Горизонтальне переміщення тарних вантажів за даною схемою було розраховано графічно шляхом побудови траєкторії переміщення захоплюючої

головки порталного робота для одного шару 27 м; ККД системи  $\eta = 0,98$ ; коефіцієнт тертя для горизонтального переміщення  $k = 0,1$ ; маса одного тарного вантажу  $m_{ct} = 25$  кг.

Сумарне переміщення пристрою захоплення в горизонтальній площині:

$$\sum_{i=1}^n x_i = 27 \cdot 7 = 189 \text{ м} .$$

Робота, здійснена при переміщенні пристрою захоплення в вертикальній площині дорівнює:

$$A_{xz} = \frac{9,8 \cdot (2 \cdot 6 + 25) \cdot 35}{0,98} = 12950 \text{ Дж} .$$

Робота, здійснена при переміщенні пристрою захоплення в горизонтальній площині:

$$A_{xc} = 0,1 \cdot (2 \cdot 6 + 25) \cdot 9,8 \cdot 189 = 6853 \text{ Дж} .$$

Відповідно сумарна енергія витрачена на формування транспортного пакету порталним роботом за схемою формування транспортного пакету з нерухомим піддоном (рис.4.2) складає:

$$E = 6853 + 12950 = 19803 \text{ Дж} .$$

Схема технологічного процесу переміщення тарних вантажів порталним роботом з рухомим піддоном має вигляд рис. 4.2. Зазначена схема характеризується переміщенням піддона вниз на висоту одного шару після вкладання кожного шару тарних вантажів. Особливістю конструкції порталного робота в даній є однакова відстань піднімання та опускання тарних вантажів протягом усього циклу формування транспортного пакету. Укладання останнього шару вантажу здійснюється без подальшого опускання платформи. Прийmemo умову, що формування шарів із тарних вантажів проводиться в тому ж порядку, що і при розглянутому вище технологічному процесі з захопленням одиничного тарного вантажу з одного і того ж початкового положення з подальшим його переміщенням по прямолінійній траєкторії (рис. 4.2). Основною перевагою даного технологічного

процесу є відносно незначні переміщення пристрою захоплення у вертикальній площині.

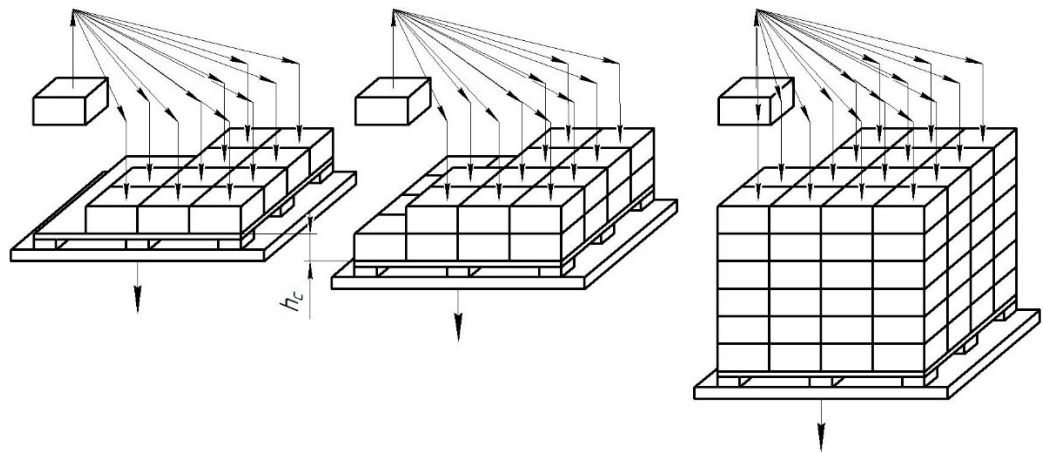


Рис. 4.2. Схема технологічного процесу формування транспортного пакету порталним роботом з використанням рухомої платформи

Приклад розрахунку енергетичних затрат за схемою формування транспортно пакету (рис. 4.2): піднімання та опускання тарного вантажу протягом усього циклу формуванні транспортного пакету – 0,2 м;

$$\sum_{i=1}^n y'_i = \sum_{i=1}^n y_i = 7 \cdot 5 \cdot 0.2 = 7 \text{ м.}$$

Сумарне переміщення пристрою захоплення у вертикальній площині:

$$\sum_{i=1}^n (y_i + y'_i) = 7 + 7 = 14 \text{ м.}$$

Тоді сумарна енергія, що витрачається приводом на здійснення технологічного процесу формування транспортного пакету за схемою рис. 4.3, складається з роботи, витраченої на вертикальне переміщення тарних вантажів, роботи, витраченої на горизонтальне переміщення тарних вантажів, і роботи витрачається на переміщення платформи, тобто:

$$E = A_y + A_x + A'_y, \quad (4.11)$$

де  $A'_y$  – робота, що витрачається на опускання платформи з шаром тарних вантажів, а також на піднімання порожньої платформи.

Враховуючи, що траєкторія і відстані для вертикального та горизонтального переміщення тарних вантажів відповідають розрахункам попередньо виконаним, то робота, що здійснюється при вертикальному переміщенні платформи з шаром тарних вантажів, визначається виразом (4.5), а робота, що здійснюється при горизонтальному переміщенні тарних вантажів, визначається виразом (4.9).

Відповідно робота, що здійснюється при переміщенні платформи дорівнює

$$A'_y = A'_{yв} + A'_{yn}, \quad (4.12)$$

де  $A'_{yв}$  – робота, здійснена при опусканні платформи з шаром тарних вантажів:

$$A'_{yв} = (m_{nl} + i \cdot m_i)g \frac{H}{2}, \quad (4.13)$$

де  $m_n$  – маса порожньої платформи;  $H$ -висота транспортного пакета,  $A'_{yn}$  – робота, здійснена при підніманні порожньої платформи:

$$A'_{yn} = m_{nl}g \frac{H}{2}. \quad (4.14)$$

Підставляючи рівняння (4.13) та (4.14) у вираз (4.12) отримуємо роботу, що здійснюється при переміщенні платформи

$$A'_y = g \frac{H}{2} (i \cdot m_i + 2m_{nl}). \quad (4.15)$$

Таким чином, сумарна енергія, що витрачається на формування транспортного пакету, дорівнює:

$$E = \frac{g \cdot (2m_s + m_i) \cdot (y_i + y'_i)}{\eta} + k(2m_s + m_i)g \sum_{i=1}^n x_i + g \frac{H}{2} (i \cdot m_i + 2m_{nl}). \quad (4.16)$$

Розглянемо застосування вище наведеної методики для визначення енергії при формуванні транспортного пакету за попередньо прийнятими характеристиками транспортного пакету. З аналізу конструкцій такого типу пакувального обладнання для формування транспортних пакетів приймемо масу платформи 50 кг. Тоді, робота, здійснена при переміщенні тарних вантажів і пристрою захоплення у вертикальній площині дорівнює:

$$A_y = \frac{9.8 \cdot (2 \cdot 6 + 25) \cdot 14}{0.98} = 5180 \text{ Дж}.$$

Робота, здійснена при перенесенні тарних вантажів пристроєм захоплення в горизонтальній площині (за аналогом попереднього технологічного процесу):

$$A_x = 6853 \text{ Дж}.$$

Сумарна робота при опусканні і підніманні платформи (4.15) становить:

$$A'_y = 9.8 \cdot \frac{1}{2} (875 + 2 \cdot 50) = 4778 \text{ Дж}.$$

Тоді сумарна енергія для формування транспортного пакету порталним роботом із рухомим піддоном за схемою формування (рис. 4.2) становить:

$$E = 5180 + 6853 + 4778 = 16811 \text{ Дж}.$$

За результатами аналітичних досліджень зроблено висновки:

- розроблені методики аналізу (4.10, 4.16) дають можливість проаналізувати енергетичну ефективність вибраного технологічного процесу формування транспортного пакету порталними роботами за відомих траєкторій руху тарних вантажів;

- встановлено, що значно більша частина енергії при формуванні транспортного пакету витрачається на переміщення порожнього пристрою захоплення;

- за результатами аналітичних досліджень встановлено, що при опусканні пристрою захоплення з тарним вантажем у вертикальній площині його привод працює в гальмівному режимі і споживає енергію, в той час як самі тарні вантажі є джерелами потенційної енергії;

- розроблено і опробовано методику для аналітичного дослідження кількості енергії гальмівного режиму платформи для кожного завантажувального шару тарних вантажів, яку споживає її привод при опусканні.

На основі проведених аналітичних досліджень запропоновано раціональну схему формування транспортного пакету порталним роботом за критерієм енергоспоживання, яка наведена на рис. 4.3.

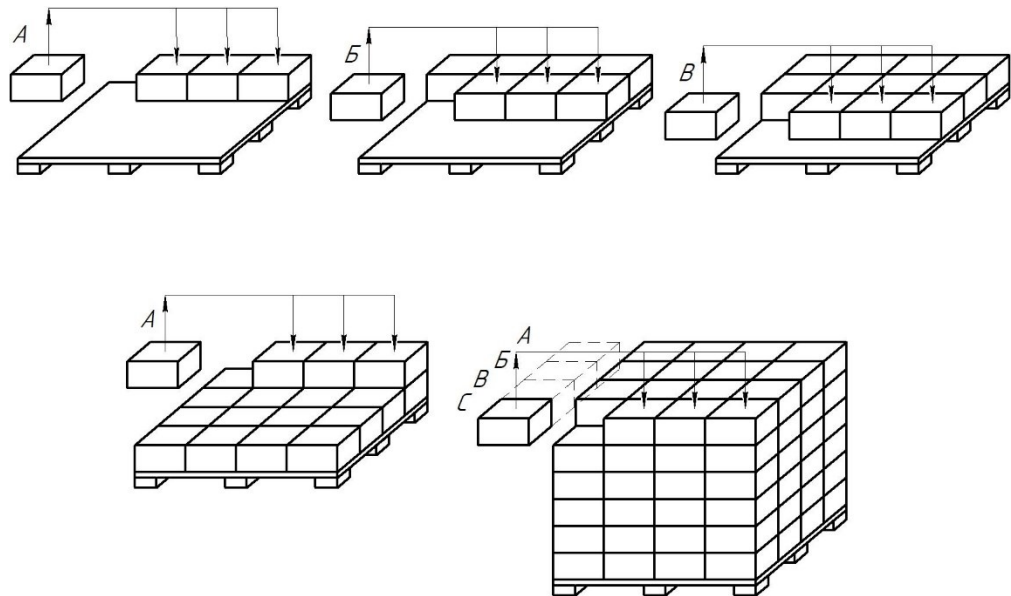


Рис. 4.3. Схема раціонального технологічного процесу формування транспортного пакету з тарних вантажів порталним роботом за критерієм оптимального енергоспоживання

Зазначена схема характеризується переміщенням піддона вниз на висоту одного шару після вкладань кожного шару тарних вантажів. Особливістю конструкції порталного робота в цій схемі є застосування оптимальних траєкторій переміщення тарного вантажу, які характеризуються однаковими відстанями вертикального та горизонтального переміщення робочих органів протягом усього циклу формування транспортного пакету. Укладання останнього шару вантажу здійснюється без подальшого опускання платформи. До переваг запропонованої схеми формування транспортного пакету (рис.4.3) можна віднести: використання потенційної енергії переміщення пристрою захоплюювання з тарним вантажем або платформи з структурним елементом транспортного пакету, як джерела енергії для її рекуперації;

- зменшення сумарної довжини траєкторії переміщення тарного вантажу в горизонтальній та вертикальних площинах шляхом оптимізації переміщень пристрою захоплювання.

Слід зазначити, що для практичної реалізації запропонованого технологічного процесу потрібно додатково використати пристрої позиціонування одиничного

тарного вантажу на конвеєрі подачі. В разі формування ряду з тарних вантажів потреби в таких пристроях не має.

Розглянемо визначення енергії при формуванні транспортного пакету за схемою рис.4.3 та попередньо прийнятими умовами. Розрахункове сумарне переміщення тарного вантажу в горизонтальній площині для формування одного шару становить 15м. Відповідно сумарне переміщення на формування транспортного пакету

$$\sum_{i=1}^n x_i = 15 \cdot 7 = 105 \text{ м} .$$

Сумарні витрати енергії при переміщенні тарних вантажів і порожнього пристрою захоплювання в горизонтальній площині розраховується за формулою (4.9) та становить:

$$A_x = 0,1 \cdot (2 \cdot 6 + 25) \cdot 9,8 \cdot 108 = 3916 \text{ Дж} .$$

Порівняльний аналіз результатів аналітичних досліджень сумарних траєкторій руху тарних вантажів у горизонтальній площині по схема формування транспортних пакетів рис.4.3 та рис 4.4 дає можливість зробити висновок, що сумарна довжина за схемою рис.4.4 значно менша і як наслідок економія витрати енергії становить:

$$\Delta E_x = 6853 - 3916 = 2937 \text{ Дж} .$$

На рис. 4.4. наведені результати аналітичних досліджень споживання енергії функціональними модулями порталного робототехнічного комплексу формування транспортного пакету за схемами: 1 – рис.4.1; 2 – рис.4.2; 3 – рис. 4.3.

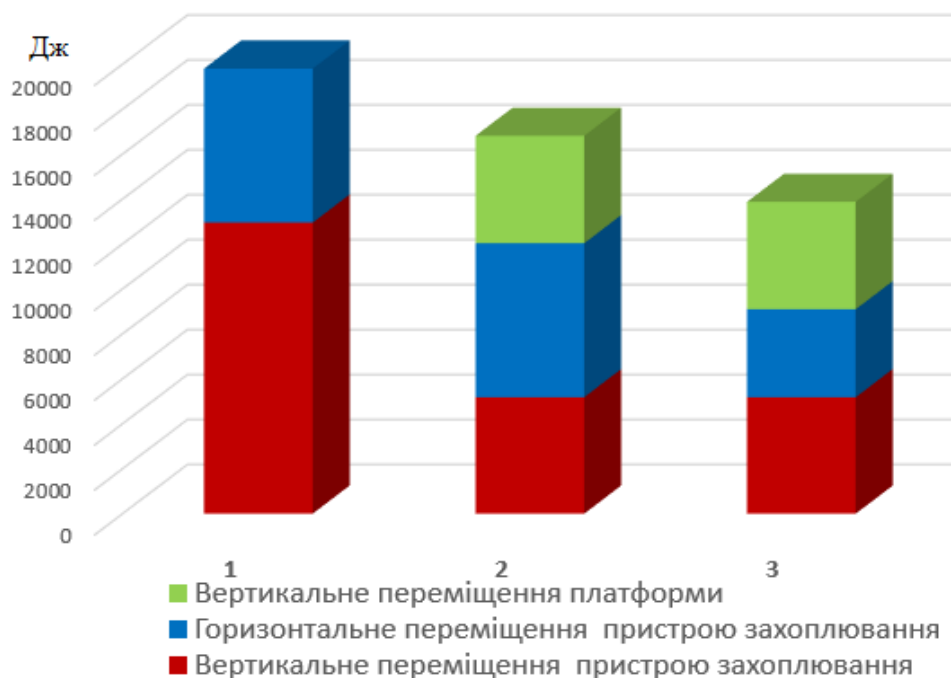


Рис. 4.4 Діаграма споживання енергії для переміщення тарних вантажів в горизонтальній та вертикальній площинах під час формування транспортного пакету за технологічними схемами: 1 – рис.4.1; 2 – рис.4.2; 3 – рис. 4.3.

Таким чином, результати аналітичних досліджень витрат енергії портального робота для формування одиничного транспортного пакету за схемою рис. 4.3 показують, що раціональна побудова траєкторій руху його робочих органів, істотно знижує споживання енергії. Встановлено, що різниця між споживанням енергії на формування транспортного пакету за типовою схемою (рис. 4.1) та запропонованою схемою (рис. 4.3) зменшилась в 1,4 рази. Подальше зменшення енергозатрат можливе за умови використання в функціональних модулях додаткових пристроїв рекуперації енергії.

## **4.2 Параметричний синтез та розробка системи керування функціонально-мехатронним модулем із пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії для вертикального переміщення тарних вантажів**

### **4.2.1 Функціонально-мехатронний модуль покрокового переміщення платформи формування структурних елементів транспортного пакету**

Мехатронний модуль покрокового переміщення платформи формування

структурних елементів транспортного пакету (рис.4.5) складається з платформи 1 на якій на піддоні пошарово формуються структурні елементи транспортного пакету 2. Приводом платформи є безштоковий пневматичний циліндр 3. Направляючі 4 служать для вертикального переміщення платформи. Мехатронний модуль покрокового переміщення платформи формування структурних елементів транспортного пакету поєднується структурно з модулем виділення одиничного піддону 5 та модулем відведення сформованого транспортного пакету 6.

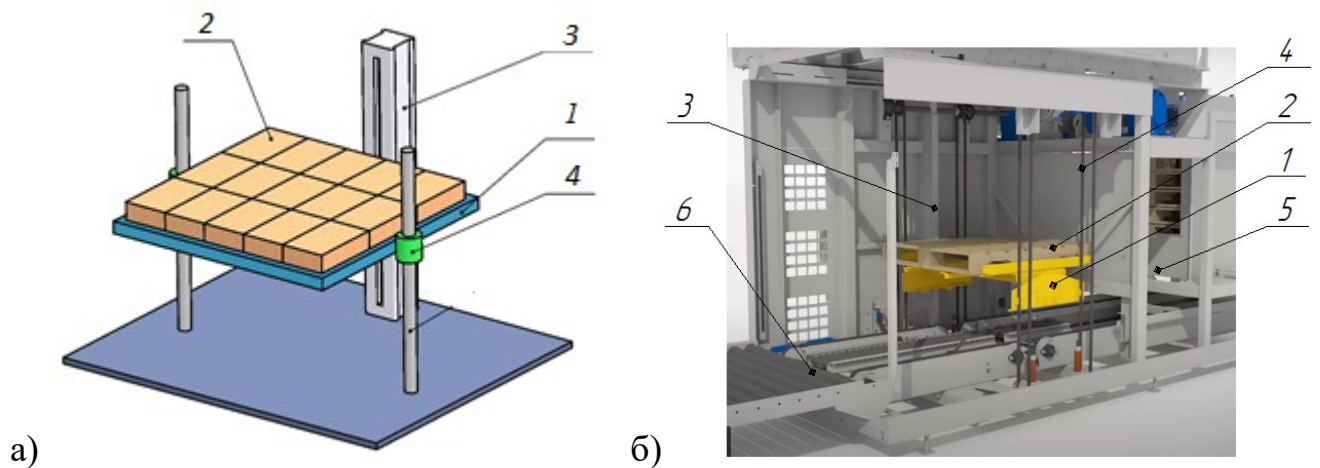


Рис. 4.5. Мехатронний модуль покрокового переміщення платформи для формування структурних елементів транспортного пакету: а – схема; б – загальний вигляд.

Для керування мехатронним модулем покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом для формування структурних елементів транспортного пакету була розроблена структурна схема керування (рис. 4.6). Вантажна платформа 1 з'єднана з кареткою безштокового пневматичного циліндра 2, може переміщатися у вертикальному напрямку по напрямній 3. На пневматичному циліндрі 2 встановлено датчик Хола 4, який визначає миттєву координату положення поршня пневмоциліндра 2, що відповідає заданій координаті положення вантажної платформи 1. Для уникнення коливань платформи під час завантаження (укладання) шару тарних вантажів встановлений фіксатор 5 у вигляді пневмоциліндра однострунької дії, який через розподільник 6 марки 3/2 з'єднаний з виходом ресивера 7, який виконує функцію пневматичного акумулятора.

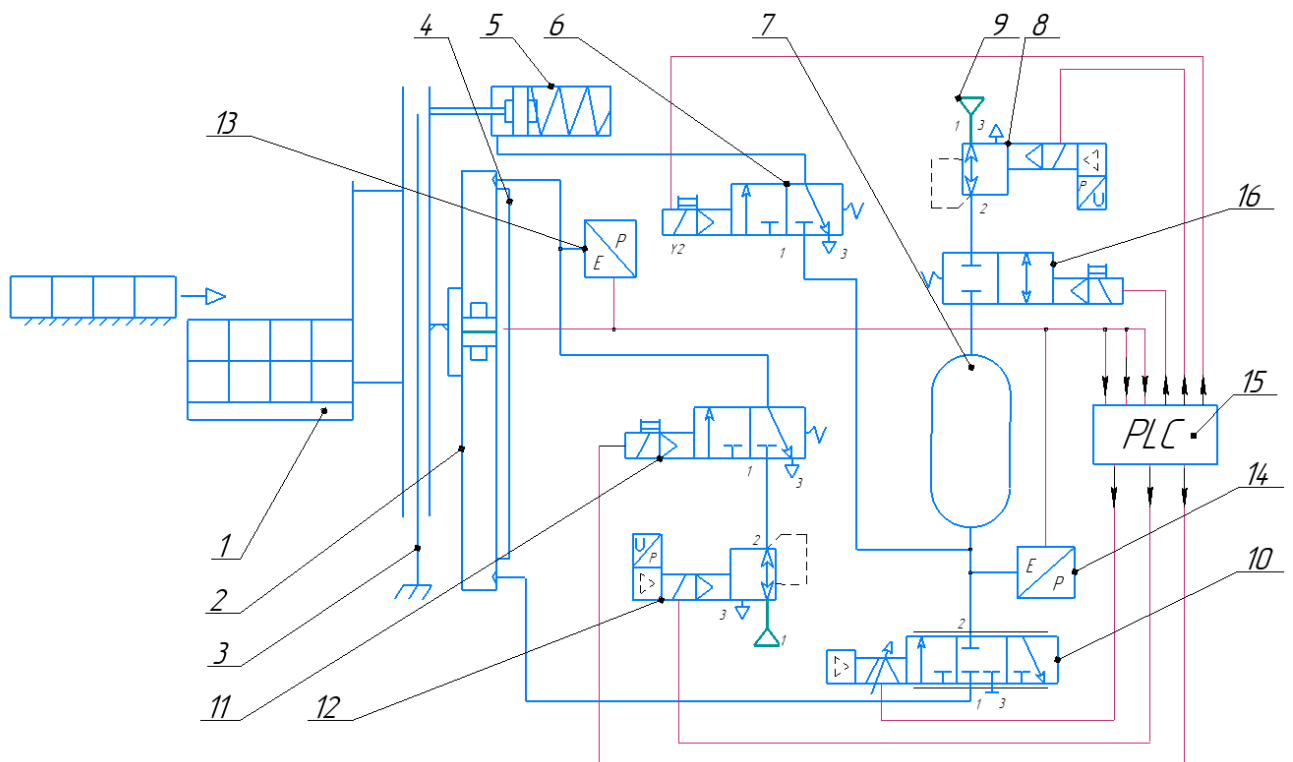


Рис. 4.6 Структурна схема керування мехатронним модулем покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії для формування структурних елементів транспортного пакету

До входу ресивера 7 під'єднаний регулятор тиску з пропорційним керуванням 8, який з магістралі 9 компенсує непродуктивні втрати повітря в пневматичній системі керування. На вихід ресивера 7 під'єднаний керований дросель (розподільник) потоку з пропорційним керуванням 10, який через систему трубопроводів підключений до нижньої порожнини циліндра 2. До верхньої порожнини циліндра 2 підключений розподільник 11 марки 3/2 та регулятор тиску 12. Контроль тиску у верхній порожнині пневмоциліндра 2 та акумуляторі 7 здійснюють два датчики тиску 13 та 14 з аналоговими вихідними сигналами. Послідовність виконання технологічного процесу забезпечує електронна система 15. Переналаштування роботи платформи у випадку зміни маси транспортного пакету відбувається за допомогою розподільника 16 марки 3/2.

Мехатронний модуль покрокового переміщення платформи формування структурних елементів транспортного пакету керується програмою через систему

керування 15 і працює наступним чином: у початковий момент часу пуста платформа 1 піднята вгору та жорстко зафіксована фіксатором 5. Розподільник 11 та керований дросель 10 знаходяться в закритому положенні. Відбувається переміщення першого шару з тарних вантажів на платформу. Після закінчення переміщення першого шару відключається фіксатор 5. Платформа під дією гравітаційних сил тяжіння опускається в низ на відстань висоти шару та фіксується фіксатором 5 в положенні I. Контроль координати позиції відбувається за допомогою сигналу із датчика положення 4. В залежності від величини зведеної маси платформи та шару тарних вантажів одночасно з фіксатором може увімкнутися дросель 10, на який подається електричний сигнал керування заданої напруги. Повітря з нижньої порожнини пневмоциліндра 2 через утворений канал в дроселі 10 попадає в акумулятор 7. Площа прохідного каналу дроселя відкривається на величину, яка забезпечує опускання платформи до положення I.

В момент, коли платформа підходить до координати зупинки I, в систему управління надходить сигнал із датчика положення 4, керуючий дросель 10 перекриває робочий канал, а фіксатор 5 зупиняє платформу. Після завантаження другого шару на поверхню першого шару, фіксатор 5 знову виключається та при необхідності знову включається дросель 10, платформа під дією гравітаційних сил тяжіння опускається в низ на відстань висоти другого шару та фіксується фіксатором в положенні II. Рух платформи з шарами тарних вантажів в позиції III та IV відбувається з обов'язковою роботою керуючого дроселя 10. Слід зазначити, що в акумуляторі 7 зростає тиск повітря, яке з кожним кроком опускання платформи створює додатковий опір. Тому для забезпечення заданої тривалості опускання платформи може включатися розподільник 11 та регулятор тиску з пропорційним керуванням 12. На регулятор 12 подається керуючий електричний сигнал, величина якого розраховується електронною системою керування 15. При цьому повітря з заданим тиском подається у верхню порожнину циліндра та підсилює сумарну силу опускання платформи з шарами тарних вантажів. Завдяки періодичному підключенню регулятора тиску 12 регулюється швидкість опускання платформи. При укладанні останнього шару тарних вантажів платформа не

переміщається, розподільники 11 увімкнений, а 6 вимкнтий. Робочий канал керуючого дроселя 10 закритий. Після завершення формування транспортного пакету відбувається його зняття з платформи. Паралельно з цим процесом вимикається розподільник 11 і стиснене повітря з верхньої порожнини пневмоциліндра скидається в атмосферу. Порожня платформа повертається у вихідне положення. Після вимкнення фіксатора 5 та вмикання керуючого дроселя 10 цикл формування нового транспортного пакету повторюється.

Переналаштування роботи платформи в разі зміни маси транспортного пакету відбувається зміною величини тиску в акумуляторі 7 за допомогою розподільника 16 та регулятора тиску з пропорційним керуванням 8.

**4.2.1.1 Параметричний синтез функціонального мехатронного модуля покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії для формування структурних елементів транспортного пакету.**

Прийmemo припущення, що процес стискання повітря в нижній порожнині циліндра є ізотермічним. Переміщення платформи після почергового укладання шарів тарних вантажів та зняття з фіксаторів можна описати рівнянням енергетичного балансу системи

$$(i \cdot m_i + m_{nl})gy_i = \frac{(i \cdot m_i + m_{nl})\dot{y}_i^2}{2} + P_{i+1}V_{i+1} \ln\left(\frac{P_i}{P_{i+1}}\right), \quad (4.17)$$

де  $i$ - кількість шарів в транспортному пакеті,  $i \cdot m_i + m_{nl}$ — зведена маса шарів тарних вантажів та платформи,  $y_i$  - поточна координата переміщення платформи під дією ваги  $i$ -го шару вантажів;  $P_{i+1}$  - тиск в нижній порожнині пневматичного циліндра після переміщення  $i$ -го шару вантажів;  $V_{i+1}$  - об'єм нижньої порожнини пневматичного циліндра, який встановився після переміщення  $i+1$  шару вантажів;  $P_i$  - тиск в нижній порожнині пневмоциліндра перед укладанням  $i$ -го шару.

Для забезпечення процесу зупинки платформи з  $i$  шаром вантажів у заданій координаті, яка відповідає висоті  $h_{i+1}$  шару, прирівнюємо її швидкість до нуля  $\dot{y}_i = 0$ , тоді рівняння (4.17) можна записати у вигляді

$$(i \cdot m_i + m_{nl})gh_i = P_{i+1}V_{i+1} \ln\left(\frac{P_i}{P_{i+1}}\right), \quad (4.18)$$

де  $h_i$  — максимальне переміщення платформи донизу під дією ваги  $i$ -го шару.

Зміна тиску в нижній порожнині пневмоциліндра після опускання  $i$ -го шару призводить до зміни її об'єму, який визначається із співвідношення (4.18) у вигляді:

$$(i \cdot m_i + m_{nl})gh_i = P_{i+1}V_{i+1} \ln\left(\frac{V_i}{V_i - Sh_i}\right), \quad (4.19)$$

де  $V_i$  - початковий об'єм повітря в нижній порожнині пневмоциліндра.

З рівняння (4.19) визначимо тиск повітря в порожнині циліндра на кінець опускання  $i$ -го шару:

$$P_{i+1} = \frac{(i \cdot m_i + m_{nl})gh_{i+1}}{V_{i+1} \ln\left(\frac{V_i}{V_i - Sh_{i+1}}\right)} \dots \quad (4.20)$$

Результати числових розрахунків розробленої математичної моделі зміни тиску в нижній порожнині пневмоциліндра під час опускання платформи з шарами тарних вантажів наведемо, прийнявши припущення: транспортний пакет сформовано із п'яти шарів тарних вантажів прямокутної форми 125x350x250 мм порталним роботом. Висота сформованого транспортного пакету становить  $h_n = 1250$  мм, маса транспортного пакету 500 кг, маса шару – 100 кг. Відповідно висота покрокового переміщення платформи з шаром тарних вантажів з урахуванням конструктивних особливостей становить 255 мм. Технічні характеристики пневматичного приводу функціонального мехатронного модуля покрокового переміщення платформи: діаметр циліндра 0,1м; хід поршня 1,3 м.

Зведена маса платформи та її рухомих частин – 50 кг. За рівнянням (4.20) визначаємо зміну тиску  $P_i$  в нижній порожнині пневмоциліндра на кінець кожного кроку опускання шару тарного вантажу (тиск на кінець першого кроку становить 187261Па). Результати числових досліджень наведено на рис. 4.7 (п'ятий шар завантажується на платформу, але процес опускання не відбувається).

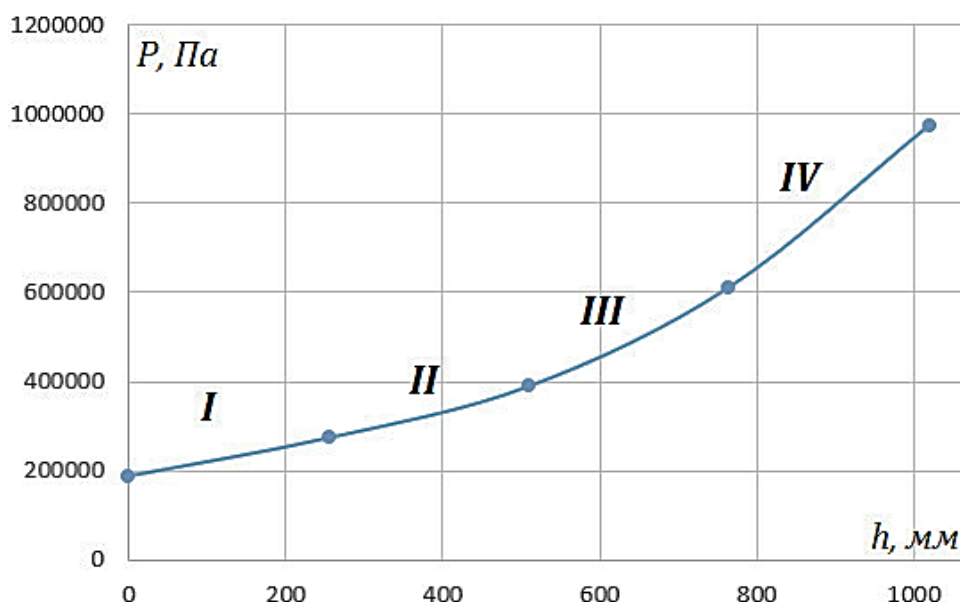


Рис. 4.7 Графік зміни тиску в нижній порожнині пневмоциліндра функціонального мехатронного модуля покрокового переміщення платформи від маси шарів; I – IV кількість шарів на платформі.

З графіка рис. 4.7 видно, що зміна тиску в порожнині пневмоциліндра має лінійну характеристику при укладанні перших двох шарів тарних вантажів. Однак, при укладанні третього та четвертого шару тиск різко зростає і як наслідок, можна припустити, що тривалість переміщення платформи збільшується. Це призводить до переходу з детермінованої системи в стохастичну щодо неконтрольованого процесу координати зупинки платформи. З метою запобігання неконтрольованих перехідних процесів опускання платформи цикл формування транспортного пакету запропоновано поділити на три етапи: перший – опускання платформи за рахунок маси шарів вантажу та платформи (4.20) ; другий – за рахунок контрольованого перетікання повітря з нижньої порожнини циліндра в ресивер акумулятора ; третій (для зупинки платформи а заданій координаті) - за рахунок одночасного контрольованого перетікання повітря з нижньої порожнини циліндра в акумулятор та контрольованої подачі тиску повітря у верхню порожнину циліндра.

Перший етап руху платформи з шаром тарних вантажів описується рівняннями (4.17 – 4.20).

На другому етапі аналітичних досліджень здійснювали опускання платформи з

шарами тарних вантажів шляхом послідовного підключення через керований дросель додаткового об'єму (акумулятора)  $V_{b1}$ . Таким чином, робота системи керування на другому етапі переміщення платформи передбачас, після укладання на платформу наступного шару тарних вантажів, знімання її з фіксатора та часткове з'єднання порожнини пневматичного циліндра з ресивером акумулятора. Процес з'єднання порожнини пневмоциліндра з ресивером акумулятора можна описати рівнянням:

$$P_i V_i + V_{b1} P_{b0} = P_i^* (V_i + V_{b1}), \quad (4.21)$$

де  $P_i$ ,  $V_i$  – початковий тиск і об'єм нижньої порожнини циліндра після укладання на платформу  $i$ -го шару вантажів;  $P_{b0}$  - початковий тиск в акумуляторі,  $P_i^*$  - тиск, який встановлюється в безштоковій порожнині пневмоциліндра після приєднання акумулятора,  $V_{b1}$  – об'єм акумулятора.

Математичну модель опускання платформи з під'єднанням акумулятора до порожнини пневмоциліндра розглянемо на етапі переміщення платформи на висоту шару  $h_i$  за умови, що частина шляху в процесі переміщення платформи з тарним вантажем  $\Delta h_{i+1.1}$  відбулося під дією зведеної маси шарів тарних вантажів без акумулятора, а решта шляху  $h_{i+1.2}$  після підключення акумулятора. При переміщенні платформи з  $i$  шаром вантажів без акумулятора в системі відбувається стискання газу під дією ваги тарних вантажів. Цей процес описується рівнянням енергетичного балансу системи:

$$(im_i + m_{пл}) \cdot g \cdot \Delta h_{i+1.1} = P_i V_i \ln \left( \frac{P_{i+1}}{P_i} \right), \quad (4.22)$$

де  $\Delta h_{i+1.1}$  - переміщення платформи з  $i$ -тим шаром тарних вантажів при відключеному акумуляторі.

Об'єм нижньої порожнини пневмоциліндра після переміщення платформи без підключення акумулятора дорівнює:

$$V_{i+1.1} = V_i - S \cdot \Delta h_{i+1.1}. \quad (4.23)$$

З урахуванням рівняння (4.23) можна записати:

$$V_{i+1.1} = V_i - \frac{S \cdot P_i V_i \ln \left( \frac{P_{i+1}}{P_i} \right)}{(m_{пл} + im_i) \cdot g}. \quad (4.24)$$

При підключенні акумулятора  $V_{b1}$  відбудеться вирівнювання тиску у порожнині пневматичного циліндра і акумулятора до значення  $P_{i+1}$ , який визначається масою шарів вантажів на платформі. Цей процес буде супроводжуватись переміщенням платформи до низу на висоту  $\Delta h_{i+1.2}$ . Рівняння, що описує поведінку системи в цей момент, можна записати у вигляді:

$$P_{i+1}V_{i+1.2} + V_{b0} \cdot V_{b1} = P_{i+1}(V_{i+1.2} - S(\Delta h_{i+1.1} + \Delta h_{i+1.2}) + V_{b1}). \quad (4.25)$$

Відповідно переміщення поршня циліндра на висоту шару  $h_i$  призвело до зменшення об'єму нижньої порожнини

$$Sh_i = V_i - S(\Delta h_{i+1.1} + \Delta h_{i+1.2}). \quad (4.26)$$

З рівняння (4.26) визначаємо об'єм повітря, яке надійшло в акумулятор при переміщенні платформи на висоту шару  $h_i$

$$V_{b1}^* = \frac{P_{i+1}(V_{i+1.2} - Sh_i)}{P_i - P_{b0}} \quad (4.27)$$

З урахуванням виразу 4.26 рівняння 4.27 для визначення об'єму повітря в акумуляторі по закінченню другого етапу має вигляд :

$$V_{bi} = \frac{\left(\frac{1}{S}(i \cdot m_i + m_{nl})g\right)(V_o - iSh_i)}{P_i - P_{b0}} \quad (4.28)$$

Відповідно рівняння енергетичного балансу з роботою акумулятора на другому етапі руху платформи має вигляд:

$$(im_i + m_{nl})gy_i = \frac{(im_i + m_{nl})\dot{y}_i^2}{2} + P_i^*(V_i + V_{b1}) \ln \left( \frac{V_i + V_{b1}}{V_i + V_{b1} - Sy_i} \right) \quad (4.29)$$

Для забезпечення процесу зупинки платформи в заданій координаті на другому етапі прирівнюємо її швидкість до нуля  $\dot{y}_i = 0$ , тоді з рівняння (4.29) можна визначити тиск на кінець закінчення другого етапу з урахуванням кількості шарів на платформі:

$$P_i^* = \frac{(i \cdot m_i + m_{nl})gh_i}{(V_i + V_{b1}) \ln \left( \frac{V_i + V_{b1}}{V_i + V_{b1} - Sih_i} \right)} \quad (4.30)$$

де  $h_i$  – задане вертикальне переміщення платформи після укладання  $i$ -го шару;

$V_i$  – початковий об’єм нижньої порожнини циліндра на момент початку другого етапу;  $V_{b1}$  – початковий об’єм акумулятора, тарних вантажів, де був приєднаний акумулятор до порожнини пневмоциліндра.

При переміщенні платформи до передостаннього шару, тиск повітря в акумуляторі є досить великим, що призводить до збільшення опору витoku повітря з нижньої порожнини циліндра та зменшення точності позиціонування і як наслідок, до появи коливальних процесів швидкості опускання. Початок третього етапу руху платформи характеризується подачею додаткового тиску повітря  $P_{oy}$  у верхню порожнину пневмоциліндра, що забезпечує додаткове зусилля опускання платформи. Відповідно рівняння енергетичного балансу на третьому етапі платформи:

$$(i \cdot m_i + m_{nl})gy_i + P_{oy}(SH - V_i) = \frac{(i \cdot m_i + m_{nl})\dot{y}_i^2}{2} + P_i^*(V_i + V_{b1}) \ln\left(\frac{V_i + V_{b1}}{V_i + V_{b1} - Sy_i}\right). \quad (4.31)$$

Для забезпечення процесу зупинки платформи в заданій координаті на третьому етапі прирівнюємо її швидкість до нуля  $\dot{y}_i = 0$ , тоді рівняння (4.31) можна записати у вигляді

$$(i \cdot m_i + m_{nl})gy_i + P_{oy}(SH - V_i) = P_i^*(V_i + V_{b1}) \ln\left(\frac{V_i + V_{b1}}{V_i + V_{b1} - Sy_i}\right). \quad (4.32)$$

З рівняння (4.32) визначимо кінцевий тиск повітря в пневматичній системі циліндр - акумулятор на кінець третього етапу:

$$P_i^* = \frac{P_{oy}(SH - V_i) + (i \cdot m_i + m_{nl})gh_i}{(V_i + V_{b1}) \ln\left(\frac{V_i + V_{b1}}{V_i + V_{b1} - Sih_i}\right)}. \quad (4.33)$$

Після закінчення третього етапу сформований транспортний пакет знімається з платформи, а з верхньої порожнини циліндра додатковий тиск скидається в атмосферу. Фіксатор відпускає платформу та вмикається керований дросель. Стиснене повітря з акумулятора потрапляє в нижню порожнину циліндра і платформа знову підіймається в початкове положення. При цьому в нижній порожнині пневмоциліндра створюється тиск  $P_{01}$ . Для того, щоб знайти тиск у ресивері після того, як тиск у циліндрі буде  $P_{01}$ , запишемо вираз:

$$P_i^* \cdot S \cdot (H - ih_i) + V_0 \cdot P_{bi}^* = P_1 \cdot S \cdot H + V_0 \cdot P_0, \quad (4.34)$$

звідки

$$P_0 = \frac{P_i^* \cdot S \cdot (H - ih_i) + V_0 \cdot P_{bi}^* - P_1 \cdot S \cdot H}{V_0}, \quad (4.35)$$

де  $P_0$  – тиск у ресивері на кінець операції піднімання пустої платформи;  $P_{bi}^*$  – тиск в ресивері після закінчення операції формування транспортного пакету;  $P_1$  – тиск в циліндрі в кінці операції піднімання пустої платформи;  $P_i^*$  – тиск в циліндрі після закінчення операції формування транспортного пакету;  $S$  - площа торця поршня пневматичного циліндра;  $H$  – хід штока пневмоциліндра.

Аналітичне дослідження описаної вище задачі формування транспортного пакету з п'яти шарів тарних вантажів проводилось для визначення тиску в пневматичній системі «пневмоциліндр – акумулятор» на кінець четвертого етапу опускання платформи. Система керування підключала ресивер акумулятора об'ємом 10 літрів ( $0,01\text{м}^3$ ) на всіх кроках опускання платформи. Значення кінцевого тиску в пневматичній системі «пневмоциліндр – акумулятор» за рівнянням (4.33) становить 435757 Па. Після піднімання порожньої платформи в початкове положення енергією стисненого повітря з акумулятора, тиск в ньому падає (4.35) до величини 320929 Па.

#### **4.2.1.2 Реалізація заданого закону руху платформи функціонально-мехатронного модуля формування структурних елементів транспортного пакету**

Для точного позиціонування платформи та дотримання кінематичних та динамічних характеристик процесу її опускання при зміні маси шару тарних вантажів або висоти переміщення необхідно визначити вид заданого закону руху з подальшим обґрунтуванням та розробкою мехатронної системи керування.

Одним із важливих критеріїв вибору раціонального закону руху платформи є умова забезпечення заданої продуктивності робототехнічного комплексу формування транспортного пакету. У подальшому будемо вважати, що

оптимальним за швидкодією законом руху платформи є окремий випадок визначеного закону руху її робочого органу за умови реалізації ним максимальної продуктивності. За основу наукового обґрунтування можливих законів руху робочих органів розглянутих в роботах [1, 2, 45, 107, 145] приймемо закон руху рис.4.8.

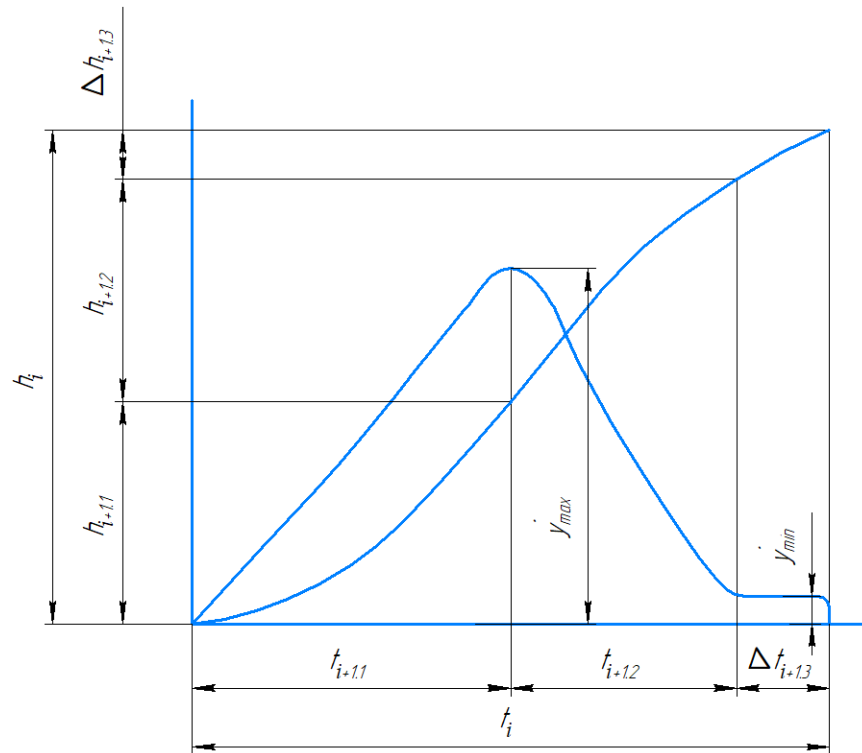


Рис. 4.8. Загальний вигляд оптимального за швидкодією закону руху опускання завантаженої платформи функціонального мехатронного модуля формування структурних елементів транспортного пакету: за умови зберігання максимальної продуктивності робототехнічного комплексу.

Одержаний закон руху дає можливість поєднати та реалізувати дві суперечливі умови роботи функціонального мехатронного модуля покрокового переміщення платформи: високу статичну точність позиціювання платформи з одночасною великою швидкодією по переміщенню в межах технічних можливостей. Траєкторія руху платформи за час переміщення  $t_i$  характеризується наявністю ділянок розгону  $t_{i+1,1}$  та гальмування  $t_{i+1,2}$ , а похибку позиціювання платформи можна

суттєво зменшити, якщо перед її зупинкою створити ділянку переміщення  $t_{i+1,3}$  з малою постійною швидкістю  $\dot{y}_{\min}$ .

Розглянемо задачу опускання платформою структурних елементів транспортного пакету за заданим законом руху (рис.4.9). Прийmemo припущення, що платформа із структурними елементами транспортного пакету розглядається як абсолютно жорстке тіло, коефіцієнт тертя  $f$  є змінним і залежить від функції швидкості платформи [45, 143, 144] та апроксимується лінійними залежностями виду:

$$f(\dot{x}) = f_0 + k_2 \dot{x}; \quad (4.36)$$

$$f(\dot{x}) = f_0 - k_1 \dot{x}. \quad (4.37)$$

Опускання платформи відбувається при сталих параметрах навколишнього середовища; керуючою силою переміщення платформи є сила пневмоциліндра  $F_{u(t)}$ , яка протягом часу  $t_i$  змінюється в межах  $0 \leq F_{u(t)} \leq Q = \text{const}$  (де  $Q$  – максимальне зусилля); реалізація миттєвого значення керуючого зусилля в системі керування мехатронним модулем платформи забезпечується керуючим параметром  $u(t)$  за рівнянням [29]:

$$F_{u(t)} = Q \cdot u, \quad (4.38)$$

де  $u$  – змінна, що є керуючим параметром для роботи мехатронного модуля в межах

$$0 \leq u \leq +1. \quad (4.39)$$

Відповідно для реалізації оптимального закону руху (рис. 4.8) під час виконання технологічних операцій покрокового опускання структурних елементів вантажного пакету на висоту шару необхідно визначити закон зміни керуючої сили  $F_{u(t)}$  для мехатронного модуля платформи як функцію часу, який зможе забезпечити її опускання з позиції I в позицію II (рис. 4.9) за найменший час  $T$  за умови, що швидкість зведеної маси шарів та платформи в початковій та кінцевій позиціях платформи дорівнює нулю

$\dot{y}_{nl} = 0$ , а її максимальне значення обмежені технічними характеристиками механічної системи:

$$0 \leq \dot{y}_{nl} \leq \dot{y}_{\max}; \quad (4.40)$$

$$Q_{\min} \leq F_{y(t)} \leq Q_{\max}, \quad (4.41)$$

де  $\dot{y}_{\max}$  – максимально допустима швидкість механічної системи, обмежена технічними характеристиками її елементів;  $Q_{\max}$  – максимально допустиме зусилля циліндра мехатронного модуля.

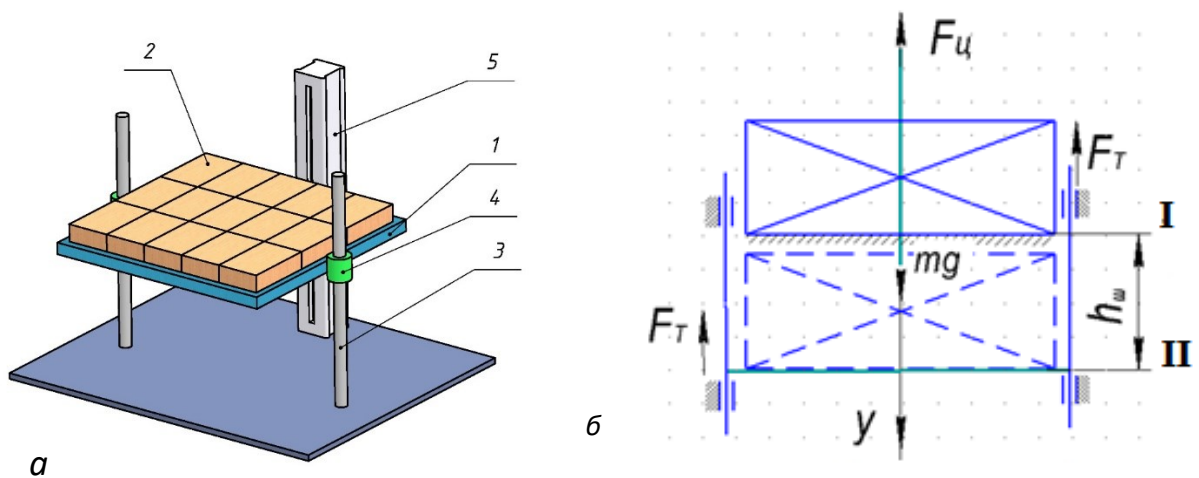


Рис. 4.9. Схеми покрокового опускання платформи з шарами тарних вантажів функціональним мехатронним модулем з пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії для формування транспортного пакету: *а* – технологічна; *б* – розрахункова.

Якщо знехтувати аеродинамічним опором то опускання структурних елементів транспортного пакету на висоту шару мехатронним модулем формування структурних елементів транспортного пакету у вертикальній площині представляє собою динамічну систему, яка описується рівнянням руху

$$(i \cdot m_i + m_{nl}) \ddot{y}_1 = (i \cdot m_i + m_{nl}) g - F_T - F_{y(t)}, \quad (4.42)$$

де  $F_T$  – сила тертя між рухомими і нерухомими частинами направляючої платформи;  $m$  – зведена маса структурного елемента транспортного пакету

та платформи;  $F_{y(t)}$  – сила опору переміщенню платформи під дією сили тяжіння. В запропонованій системі реалізації заданого закону руху платформи з шарами тарних вантажів з подальшим її позиціонуванням передбачається, що зміна миттєвого значення сили опору переміщенню платформи під дією сили тяжіння  $F_{y(t)}$  є керуючим параметром роботи мехатронної системи.

Введемо позначення  $\dot{y}_1 = y_2$  та відповідно до нього рівняння руху (4.42) представимо системою диференціальних рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \dot{y}_1 &= y_2; \\ \dot{y}_2 &= g - \frac{N}{i \cdot m_i + m_{nl}} (f_0 + k \cdot y_2) - \frac{F_{y(t)}}{i \cdot m_i + m_{nl}}. \end{aligned} \right\} \quad (4.43)$$

За умови використання в конструкції підшипникового вузла з підшипників кочення, значення нормального зусилля в напрямних платформи  $N$  змінюється в малих межах, що дозволяє вважати його постійним. Тоді відношення  $\frac{N}{i \cdot m_i + m_{nl}} = A$  є величиною постійною, а рівняння (4.43) можна записати у вигляді

$$\left. \begin{aligned} \dot{y}_1 &= y_2; \\ \dot{y}_2 &= g - A(f_0 + k \cdot y_2) - \frac{F_{y(t)}}{i \cdot m_i + m_{nl}}. \end{aligned} \right\} \quad (4.44)$$

В системі рівнянь (4.44) керуючий параметр  $F_{y(t)}$  змінюється лінійно, тому, використовуючи принцип максимуму Л.С. Понтрягіна складаємо Гамельтоніан [45]:

$$H = \psi_1 \cdot y_2 + \psi_2 \left[ g - A(f_0 + k \cdot y_2) - \frac{F_{y(t)}}{i \cdot m_i + m_{nl}} \right], \quad (4.45)$$

де  $\psi_1, \psi_2$  – спряжені змінні, які характеризуються керуючими параметрами і забезпечують найбільш оптимальне за швидкістю керування

$$F_u = \begin{cases} F_{u(t)=\min} & \text{при } \psi_2 > 0; \\ F_{u(t)=\max} & \text{при } \psi_2 < 0. \end{cases} \quad (4.46)$$

Процес опускання платформи з структурними елементами транспортного пакету з використанням закону руху (рис.4.8) показано на рис. 4.10.

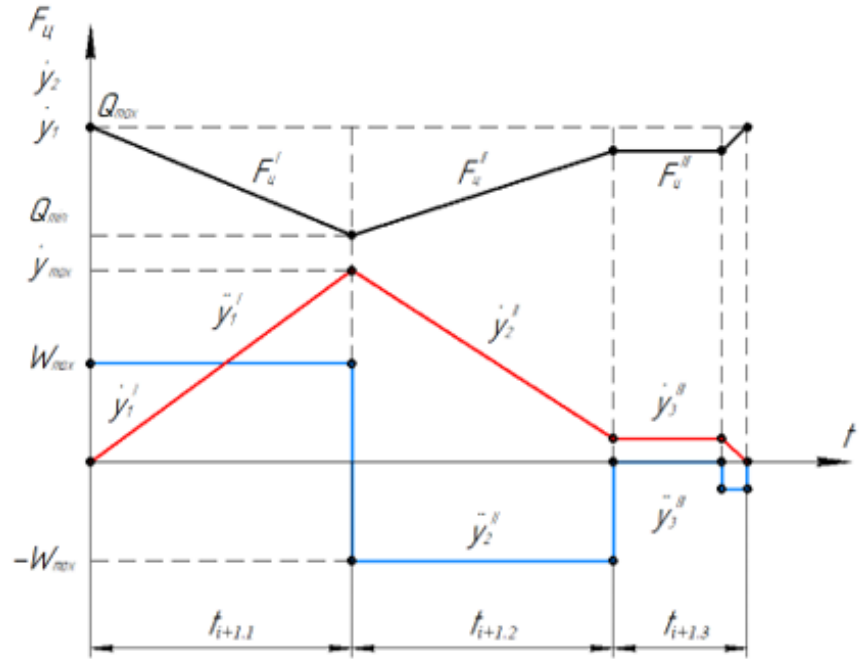


Рис. 4.10 Залежність зміни: сили керування  $F_{u(t)}$  пневматичним приводом; координати  $y_2$ , швидкості  $\dot{y}_2$  та прискорення  $\ddot{y}_2$  переміщення платформи з шарами тарних вантажів від часу її опускання  $t$  на один крок за умови реалізації оптимального закону руху.

Етап розгону платформи позначений цифрою I. Режим роботи на даному етапі характеризується зменшенням сили керування та збільшенням швидкості платформи  $y_2^I$  за лінійною характеристикою. Рух платформи відбувається з максимально допустимим прискоренням  $\dot{y}_2^I = W_{\max} = const$  та постійно зростаючою силою опору. Рівняння зміни сили керування за умови її мінімального значення на даному етапі має вигляд

$$F_u^I = (i \cdot m_i + m_{nz})(-g + A(f_0 + k \cdot y_2) - W_{\max}), \quad (4.47)$$

а рівняння руху

$$\left. \begin{aligned} \dot{y}_1^I &= y_2; \\ \dot{y}_2^I &= W_{\max}. \end{aligned} \right\} \quad (4.48)$$

Проінтегруємо рівняння (4.48) з урахуванням граничних умов і знайдемо значення зміни швидкості та координати зведеної маси

$$y_2^I = W_{\max} \cdot t; \quad (4.49)$$

$$y_1^I = \frac{W_{\max}}{2} \cdot t^2. \quad (4.50)$$

При досягненні мінімальної сили керування  $Q_{\min}$ , яка характеризується проміжним значенням часу  $t = t_{i+1.1}$ , система переходить до другого етапу (II) руху, який характеризується процесом гальмування платформи. Для зменшення ударних навантажень під час переходу від етапу розгону до етапу гальмування передбачається використання програмних фільтрів плавного переходу. Режим роботи забезпечується збільшенням значення керуючої сили  $F_{u(t)}^{II}$ , яка лінійно змінюється, як і функція швидкості  $y_2^{II}$ . Рух зведеної маси відбувається з від'ємним прискоренням  $-\dot{y}_2^{II}$ . Для недопущення неконтрольованого впливу сил опору стисненого повітря в акумуляторі на характеристику зміни швидкості опускання платформи до кінцевої позиції передбачаємо можливість подачі додаткового тиску повітря  $P_{\partial y}$  у верхню порожнину пневмоциліндра, що забезпечить зміну додаткового зусилля опускання платформи [45]. Рівняння зміни рушійної сили на даному етапі має вигляд

$$F_{u(t)}^{II} = (i \cdot m_i + m_{nv})(g + A(f_0 - k \cdot y_2) - W_{\max}) + P_{\partial y} \cdot S, \quad (4.51)$$

а рівняння руху

$$\left. \begin{aligned} \dot{y}_1^{II} &= y_2 \\ \dot{y}_2^{II} &= -W_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (4.52)$$

Проінтегруємо рівняння (4.47) з урахуванням граничних умов та визначимо значення кінематичних параметрів даного етапу

$$y_2'' = C_1 - W_{\max} \cdot t; \quad (4.53)$$

$$y_1'' = C_2 + C_1 \cdot t - \frac{W_{\max}}{2} \cdot t^2, \quad (4.54)$$

де  $C_1, C_2$  – постійні інтегрування.

Таким чином для реалізації законів руху платформи зі структурними елементами транспортного пакету мехатронним модулем з пневмоциліндром під час виконання операції опускання необхідно задатися початковими параметрами процесу:  $m; f_0; k; h_u; W$ . Реалізація кінематичних параметрів на кожній ділянці руху потребує зміни сили керування, яка описується системою рівнянь (4.47) та (4.51).

#### 4.2.1.3 Синтез системи керування функціональним мехатронним модулем покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом

Представимо структуру керування мехатронним модулем формування транспортного пакету з пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії у вигляді схеми рис.4.11. Стан роботи мехатронного модуля контролюється вихідними величинами [17 – 19, 81] :

$$y = (y_1, \dots, y_n), \quad (4.55)$$

де  $y_1$  - лінійна координата;  $y_2$  - величина швидкості;  $y_3$  - величина прискорення і т. д.

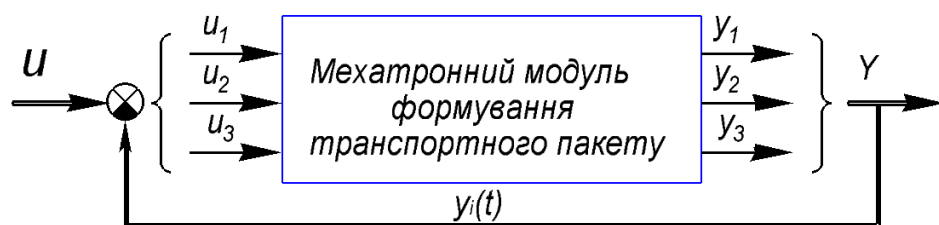


Рис. 4.11. Принципова схема системи керування функціональним мехатронним модулем покрокового переміщення платформи з пневматичним

приводом та функцією рекуперації енергії для формування структурних елементів транспортного пакету.

На вхід системи керування функціонального мехатронного модуля покрокового переміщення платформи формування структурних елементів транспортного пакету подається сигнал керування, який складається з розрахункових величин типу

$$u = (u_1, \dots, u_r) \quad (4.56)$$

де  $u_1$  – лінійна координата платформи;  $u_2$  – швидкість платформи;  $u_3$  – прискорення платформи і т. д. Обов'язковим елементом системи є зворотний зв'язок, який передає в реальному часі поточну інформацію вихідних змінних  $y_i(t)$ . Основним керуючим елементом в ланцюгу між контуром керування і силовим контуром пневматичного привода є дросель з пропорційним керуванням (схема керування мехатронного модуля наведена на рис. 4.6), який забезпечує регулювання зміни потоку стисненого повітря з пневмоциліндра до акумулятора. У комплекті з електронною системою керування дросель з пропорційним керуванням сприймає сигнал типу

$$U_{yi} = k_y \cdot U_o \quad (4.57)$$

де  $k_y$  – коефіцієнт підсилення керуючого сигналу;  $U_o$  – сигнали керування запірним клапаном регулятора потоку. Дросель з пропорційним керуванням відноситься до переліку серійних пристроїв, які виробляються різними виробниками (SMS, Cammozi, Festo, тощо) та забезпечує зміну площі прохідного каналу, яка в подальшому буде характеризуватися значенням ефективної площі  $f_e$ . Основною характеристикою елементу є залежність змінного перерізу прохідного каналу стисненого повітря від вхідного електричного сигналу. Структурна схема керування функціональним мехатронним модулем покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом передбачає, що вхідний електричний сигнал завжди є позитивним і змінюється в межах від 0 до 10 В. Тоді величина витрати повітря з

порожнини пневмоциліндра до акумулятора залежить від значення вхідного електричного сигналу  $U_y$  з урахуванням характеристики його перетворення і визначається як

$$Q^i = k_{cm} \cdot k_y \cdot U_y^i, \quad (4.58)$$

де,  $k_{cm}$  – коефіцієнт пропорційності;  $k_y$  – коефіцієнт підсилення.

Враховуючи, що регулювання потоку стисненого повітря з порожнини пневмоциліндра в ресивер акумулятора за схемою (рис. 4.6) має зворотний зв'язок по контролю тиску в порожній пневмоциліндра та координаті платформи то існує потреба визначити залежність зміни миттєвого тиску в порожнині циліндра та відповідно зусилля опору переміщення платформи від зміни миттєвої ефективної площі  $f_e^-$  каналу клапана.

Рівняння, яке описує величини витоку стисненого повітря  $G^-$  з пневмоциліндра через ефективну площу дроселя має вигляд:

$$G_- = j_0 \cdot f_e^- \cdot \bar{K} \cdot (P_m / \sqrt{R \cdot T}) \cdot \phi(\sigma_y), \quad (4.59)$$

де,  $f_e^-$  – ефективна площа прохідного перерізу отвору витоку, знаходиться з умови  $f_e^i = \mu \cdot f_i$ ;  $f_i$  – площа прохідного перерізу каналу дроселя;  $\mu$  – коефіцієнт витрат;  $R$  – універсальна газова стала;  $T$  – температура повітря на виході з пневмоциліндра;  $\phi(\sigma_y)$  – функція витрат.

В процесі опускання платформи з шарами тарних вантажів ефективна площа дроселя постійно змінюється. Представимо миттєву величину її зміни у вигляді  $\Delta f$ . Тоді для порожнини витоку повітря з пневмоциліндра зміна площі має вигляд

$$f_1^- = f_0^- - \Delta f. \quad (4.60)$$

При цьому величина зміни забезпечується сигналом керування  $\Delta f = k_{cm} \cdot U_{y1}$ , який впливає на зміни тиску в порожнині ресивера акумулятора та витрату повітря на еквівалентні величини  $\Delta$

$$p_1 = p_0 - \Delta p; G_1^- = G_0^- - K_0^- \Delta p. \quad (4.61)$$

Як наслідок таких змін отримуємо керуючу силу, яка за умови, що вона є меншою рушійної сили, призводить до опускання завантаженої платформи з кінематичними параметрами зміни координати, швидкості та прискорення, що еквівалентні величинам:

$$y = y_0 + \Delta y; \dot{y} = \dot{y}_0 + \Delta \dot{y}; \ddot{y} = \ddot{y}_0 + \Delta \ddot{y}, \quad (4.62)$$

де,  $y, \dot{y}, \ddot{y}$  – відповідно координата, швидкість та прискорення переміщення форми.

Підставимо рівняння (4.60), (4.61) та (4.62) в формулу (4.71) і після відповідних перетворень отримаємо рівняння для визначення швидкості зміни тиску в порожнині пневмоциліндра від величини сигналу керування:

$$p \cdot y_0 = f_0 \cdot K \cdot \frac{f_e^-}{S} \cdot G_0^- \cdot \frac{p_M K_G}{p_0} \cdot p - 2 \cdot K \cdot \frac{f_e^-}{S} \cdot G_0^- \cdot k_{cm} \cdot U_y - p_0 \cdot \dot{y}, \quad (4.63)$$

де  $K_G = 1 - K_0^- p_0 / (G_0^- p_M)$ ;  $S$  - площа торця поршня.

Отримане рівняння (4.63) не показує зміну величини керуючої сили пневмоциліндра, тому перейдемо від тиску до зусилля, використовуючи рівняння перетворення

$$S = F_{u=\max} / p. \quad (4.64)$$

Підставимо рівняння (4.64) у вираз (4.63) та отримаємо кінцеве рівняння для визначення зміни зусилля, яке виникає під час зміни тиску в порожнині циліндра:

$$\dot{F}_u = c_x \cdot (k_p \cdot F_{u(t)} - \dot{y} - k_{cm} \cdot k_\beta \cdot U_y), \quad (4.65)$$

$$\text{де } c_x = \frac{p_0 \cdot S}{x_0}; \quad k_\beta = 2 \cdot y^*; \quad (4.66)$$

$x^*$  - стала швидкість штоку циліндра у випадку переміщення клапана розпо-дільника в крайнє положення та повного відкриття каналу:

$$x^* = K \cdot \frac{f_e^- \cdot G_0^- \cdot p_0}{S \cdot p_i}; k_p = f_0 \cdot \frac{x^* \cdot k_G}{S \cdot p_0}. \quad (4.67)$$

Для реалізації закону руху платформи з шарами тарних вантажів необхідно на вхід пропорційного дроселя регулювання потоку подати сигнал керування у вигляді  $U_p$ . Наявність системи контролю руху платформи у вигляді паралельних зворотних зв'язків з переміщення, швидкості та прискорення дозволяє відслідковувати характеристики руху платформи та вносити корегування. Враховуємо, що запропонована структура керування мехатронним модулем покрокового переміщення платформи відслідковує тільки позиціонування платформи в реальному часі по зворотному зв'язку, а решта кінематичних параметрів є розрахунковими то в такому разі розрахунковий сигнал для керуванням дроселя має вигляд:

$$U_p = k_1 \cdot (\bar{y} - y) - k_2 \cdot \dot{y} - k_3 \cdot \ddot{y}, \quad (4.68)$$

де  $\bar{U}_p$  – розрахунковий сигнал керування дроселем;  $k_1; k_2; k_3$  – коефіцієнти передачі у відповідних контурах зворотних зв'язків.

Додатковим контуром контролю процесу руху платформи передбачено зворотний зв'язок по тиску повітря  $P$  в порожнині пневмоциліндра з подальшим математичним розрахунком по зусиллю при відомих геометричних розмірах пневмоциліндра [58 – 104]:

$$k'_p = k_{cm} \cdot k_y \cdot k_\beta \cdot k_F; \quad (4.69)$$

де  $k_F$  – коефіцієнти передачі в контурі зворотного зв'язку за зусиллям.

З урахуванням рівняння (4.72) приведений коефіцієнт керування має вигляд

$$\bar{k}_p = k_p + k'_p = f_0 \cdot \frac{y^* \cdot k_G}{S \cdot p_0} + k_{cm} \cdot k_y \cdot k_\beta \cdot k_F. \quad (4.70)$$

Слід зазначити, що на останніх кроках переміщення платформи тиск повітря в акумуляторі зростає, що призводить до суттєвого опору переміщення платформи і, як наслідок, до стохастичного режиму роботи системи керування. Для

забезпечення детермінованого режиму роботи системи керування на цих кроках переміщення платформи було запропоновано подачу додаткового тиску повітря  $P_{\partial y}$  у верхню порожнину пневмоциліндра, який забезпечить додаткове  $F_{\partial y}$  зусилля опускання платформи.

Об'єднаємо рівняння (4.70), (4.68), (4.65) з урахуванням закону руху зведеної маси та отримаємо математичну модель-спостерігача:

$$\begin{cases} (i \cdot m_i + m_{nl}) \ddot{y} = (i \cdot m_i + m_{nl}) g - F_T - F_{u(t)} + F_{\partial y}; \\ \dot{F}_u = c_x \cdot (\bar{k}_p \cdot F_{u(t)} - k_{cm} \cdot k_\beta \cdot U_y - \dot{y}); \\ \bar{k}_p = f_0 \cdot \frac{y^* \cdot k_G}{S \cdot P_i} + k_{cm} \cdot k_y \cdot k_\beta \cdot k_F; \\ U_y = k_y \cdot U_p; \\ U_p = k_1 \cdot (\bar{y} - y) - k_2 \cdot \dot{y} - k_3 \cdot \ddot{y}. \end{cases} \quad (4.71)$$

Послідовність структурного синтезу мехатронного модуля покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом для формування структурних елементів транспортного пакету на основі отриманих зв'язків між технологічними параметрами формування транспортного пакету, системою керуючих сигналів та функцією рекуперації енергії показана у вигляді блок-схеми рис. 4.12.

## 4.2.2 Функціонально-мехатронний модуль із пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії для укладання тарних вантажів

### 4.2.2.1 Параметричний синтез функціонального мехатронного модуля з пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії для укладання тарного вантажу

На основі аналізу діаграми (рис. 4.4) споживання енергії на здійснення технологічних операцій формування транспортного пакету встановлено, що основні технологічні операції, які можуть забезпечити функцію рекуперації енергії виконуються у вертикальній площині.

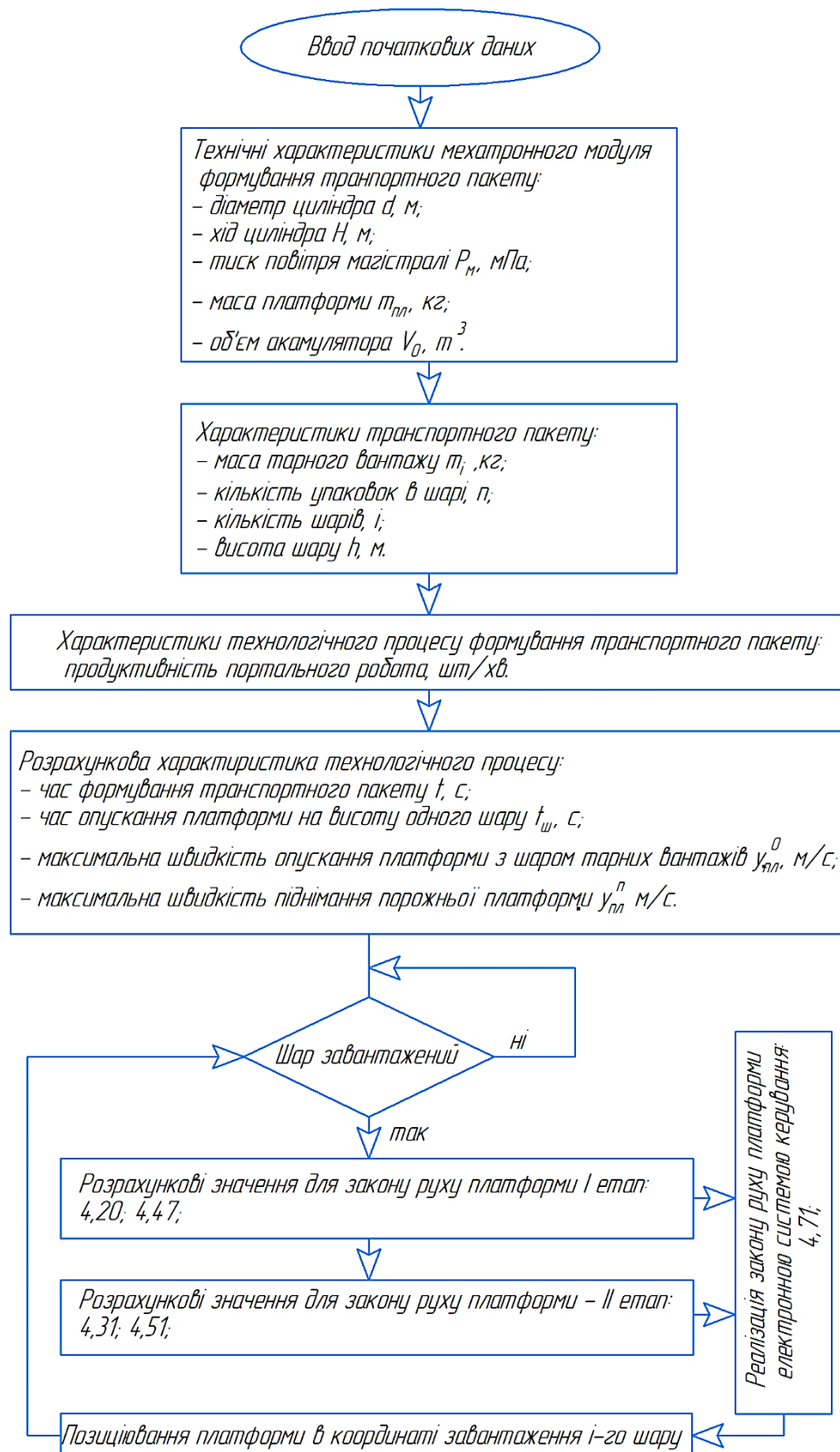


Рис.4.12. Блок-схема параметричного синтезу мехатронного функціонального мехатронного модуля покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом для формування структурних елементів транспортного пакету на основі отриманих зв'язків між технологічними параметрами формування транспортного пакету, системою керуючих сигналів та функцією рекуперації енергії .

До таких технологічних операцій відноситься укладання тарного вантажу порталним роботом. Функціональний модуль укладання є типовою конструкцією в будь-якому порталному роботі. Особливістю конструкції такого модуля в запропонованій технологічній схемі формування транспортного модуля (рис.4.3) є рух штоку пневмоциліндра між двома кінцевими позиціями за умови опускання тарного вантажу на задану висоту. З аналізу конструкцій вітчизняних та закордонних виробників (таблиця 1.4) в модулях укладання тарних вантажів застосовуються електричний та пневматичний приводи. Традиційно функціональний мехатронний модуль укладання тарного вантажу (рис.4.13,а) складається з рухомої каретки 1, на якій закріплений виконавчий пристрій вертикального переміщення 2. Рух пристрою відбувається по направляючих 3 та 4. Приводом пристрою є переважно електричний сервопривод 5, рідше застосовується пневматичний привод. Робочим органом захоплення та утримання тарного вантажу або ряду тарних вантажів є захоплюючий пристрій 6.

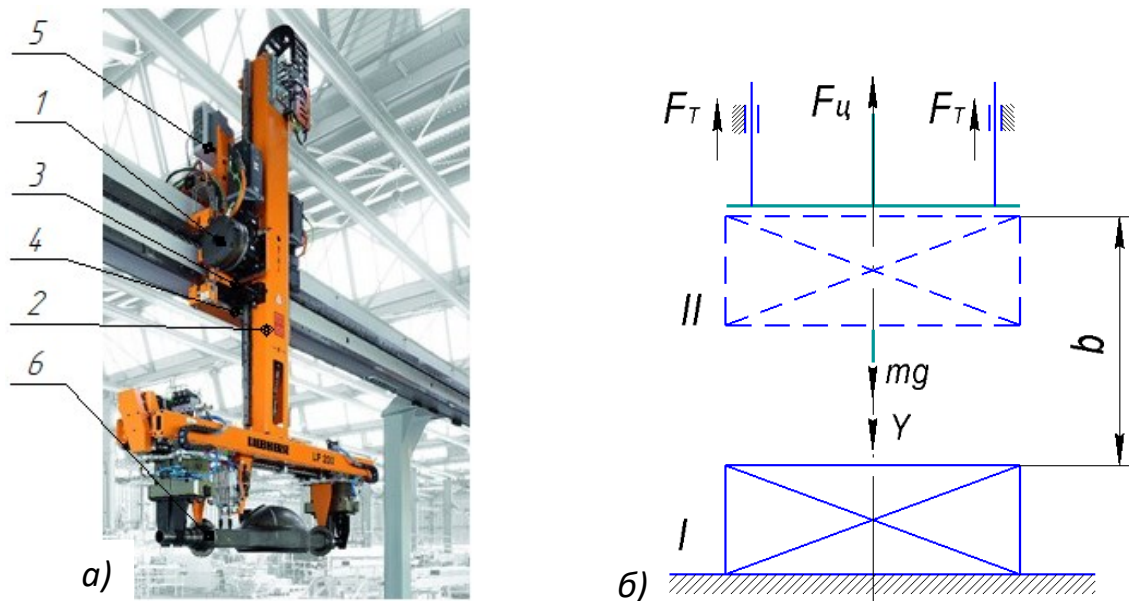
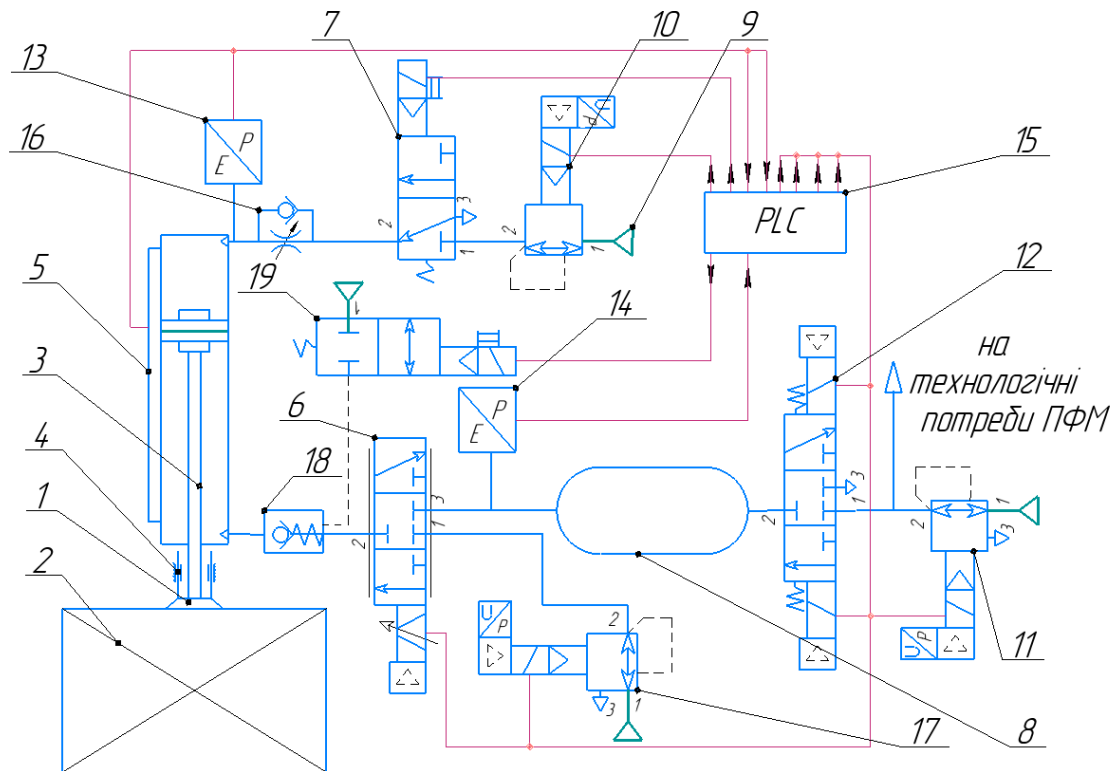


Рис.4.13 Схеми функціонального мехатронного модуля укладання тарного вантажу: а – технологічна; б – розрахункова для операції укладання.

Особливістю роботи типових мехатронних модулів укладання тарних вантажів є наявність функції позиціонування у вертикальній площині, що суттєво ускладнює їх конструкцію та систему керування, вимагає використання коштовних

електричних сервосистем. В роботі пропонується використовувати мехатронний модуль укладання тарного вантажу за схемою (рис. 4.3) із застосуванням пневматичного приводу. Керування таким мехатронним модулем відбувається по запропонованій схемі (рис.4.14), яка в своїй структурі має пневматичний акумулятор енергії.



4.14 Структурна схема керування функціональним мехатронним модулем з пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії для укладання тарного вантажу

Пристрій захоплення 1 тарного вантажу (ряду тарних вантажів) 2 з'єднаний зі штоком пневматичного циліндра двосторонньої дії 3 та може переміщатися у вертикальному напрямку по напрямних 4. На пневматичному циліндрі 3 встановлено датчик Хола 5, який визначає миттєву координату положення поршня пневмоциліндра двосторонньої дії 3, що відповідає певній координаті положення тарного вантажу 2 в просторі по осі Y. Роботою пневмоциліндра керує пропорційний клапан регулювання потоку 6 за умови виключеного розподільника 7 марки 3/2. Повітря зі штоковї порожнини циліндра виходить через пропорційний клапан регулювання потоку 6, потрапляє в ресивер 8, який

виконує функцію пневматичного акумулятора. Повітря в поршневу порожнину циліндра входить з магістралі 9 через регулятор тиску з пропорційним керуванням 10. До входу ресивера 8 під'єднаний регулятор тиску з пропорційним керуванням 11, який компенсує непродуктивні втрати повітря в пневматичній системі керування при вмиканні розподільника 12 марки 3/3. Контроль тиску у поршневій порожнині пневмоциліндра 4 та акумуляторі 8 здійснюють два датчика тиску 13 та 14 з аналоговими вихідними сигналами. Послідовність виконання технологічного процесу забезпечує електронна система 15. Швидкість піднімання тарного вантажу регулюється керованим дроселем зі зворотним клапаном 16. Автоматичне налаштування тиску магістралі на виконання операції піднімання тарного вантажу в разі зміни його маси забезпечує регулятор тиску з пропорційним керуванням 17. Техніка безпеки забезпечується керованим зворотним клапаном 18 та розподільником 19 марки 2/2.

Функціональний мехатронний модуль з пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії для вертикального переміщення тарного вантажу керується програмно через систему керування 17 і працює наступним чином: у початковий момент пристрій захоплення 1 піднятий вгору (позиція I, рис. 4.13, б). Одиначний тарний вантаж (або ряд тарних вантажів) подається по конвеєру в місце захоплення. При цьому розподільник 7 виключений, пропорційний клапан регулювання потоку 6 знаходиться в положенні, коли в штокову порожнину циліндра подається повітря з магістралі 19 через регулятор тиску з пропорційним керуванням 17. Величина тиску розраховується з умови утримання зведеної маси пристрою захоплення 1 та рухомих частин пневмоциліндра 3. По команді електронної системи керування 15 перемикається пропорційний клапан регулювання потоку 6, з'єднуючи штокову порожнину циліндра з акумулятором 8 через регульований канал клапану. Шток циліндра 2 опускає пристрій захоплення 1 по напрямних 4 до тарного вантажу (позиція II, рис. 4.13, б). Швидкість опускання регулюється змінною площею каналу клапана 6. Хід поршня циліндра реалізується між двома крайніми позиціями. Після опускання штоку відбувається захоплення тарного вантажу 2 пристроєм захоплення 1. Після цього

клапан потоку 6 дає команду на підняття пристрою захоплення 1 з тарним вантажем 2 у вертикальній площині (позиція I) повітрям з магістралі 19 через регулятор тиску з пропорційним керуванням 17. Одночасно з цим вмикається механізм горизонтального переміщення (на схемі не показано). Після позиціювання системи з тарним вантажем в місце укладання включається пропорційний клапан регулювання потоку 6. Захоплювальний пристрій з тарним вантажем під дією гравітаційних сил тяжіння опускається до низу на відстань  $b$  в положення I (рис. 4.13, б). Повітря зі штокової порожнини пневмоциліндра 3 через змінний по площі канал клапана 6 попадає в акумулятор 8. Контроль координат позицій відбувається за допомогою сигналу із датчика положення 5. Слід зазначити, що в акумуляторі 8 зростає тиск повітря, яке при опусканні тарного вантажу створює додатковий опір, який може призвести до суттєвого зменшення швидкості виконання операції укладання і, як наслідок, збільшення її тривалості. Тому для забезпечення заданої швидкості опускання пристрою захоплення з тарним вантажем в позицію II включається розподільник 7 та регулятор тиску з пропорційним керуванням 10, що забезпечує підсилення сумарної сили переміщення тарного вантажу. В процесі розвантаження тарного вантажу пристроєм захоплення вимикається розподільник 7 і стиснене повітря з поршневої порожнини циліндра скидається в атмосферу. По закінченню укладання тарного вантажу на піддон або на попередньо сформований шар вмикається пропорційний клапан регулювання потоку 6 і стиснене повітря з акумулятора 8 піднімає пристрій захоплення в положення I з одночасним його переміщенням механізмом горизонтального переміщення на позицію завантаження (на схемі не показано). Далі цикл роботи функціонального мехатронного модуля вертикального переміщення тарних вантажів з функцією рекуперації енергії повторюється. Переналаштування роботи мехатронного модуля в разі зміни маси такого вантажу відбувається зміною величини тиску пропорційним регулятором 17. Тиск повітря з ресивера 8 може бути використаний на додаткових технологічних операціях в робототехнічних комплексах. А його регулювання та підтримка постійного значення забезпечується розподільником 12 та регулятором тиску з пропорційним керуванням 11.

На рис. 4.15 наведена спрощена схема функціонального мехатронного модуля з функцією рекуперації пневматичної енергії для вертикального переміщення тарного вантажу. Пристрій захоплення 1 з тарним вантажем 2 з'єднаний зі штоком пневмоциліндра 3, до якого на етапах переміщення тарного вантажу у вертикальній площині через керований дросель 4 підключений акумулятор у вигляді балону 5 та регулятор тиску 6. Зміна тиску повітря у поршневій порожнині циліндра на етапі укладання відбувається керованим регулятором тиску 7 з магістралі 8. Навантаження на поршень циліндра 3 є змінним і залежить від кількості тарних вантажів.

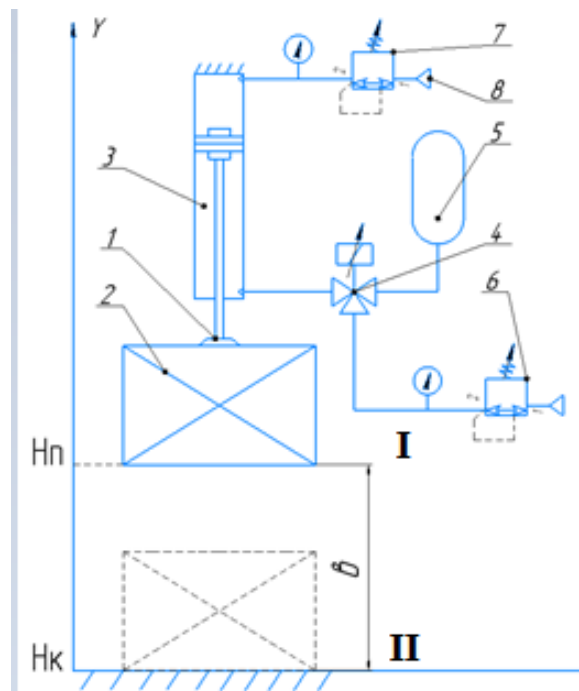


Рис. 4.15. Розрахункова схема функціонального мехатронного модуля укладання тарного вантажу з послідовним підключенням акумулятора

#### 4.2.2.2 Синтез системи керування функціональним мехатронним модулем з пневматичним приводом для укладання тарних вантажів

Враховуючи, що технологічні процеси роботи мехатронного модуля формування структурних елементів транспортного пакету (рис. 4.6) та укладання тарного вантажу (рис. 4.14) мають один закон руху робочих органів, однотипні керуючі сигнали та споріднені системи керування то відповідно основні закономірності динамічної моделі функціонального мехатронного модуля укладання тарного вантажу схожі з моделлю мехатронного модуля формування

структурних елементів транспортного пакету, які розглянуто в підрозділі 4.2. Тому звернемо увагу лише на їх відмінності. Рекуперація енергії повітря в запропонованій схемі керування (рис.4.15) відбувається тільки під час опускання тарного вантажу або ряду з тарних вантажів з позиції I в позицію II. Процес укладання забезпечується за рахунок контрольованого перетікання повітря зі штокової порожнини циліндра в акумулятор 5 та частковою подачею стисненого повітря в поршневу порожнину циліндра 3.

Прийmemo припущення, що процес стискання повітря в порожнинах циліндра ізотермічний. Приєднання акумулятора до порожнини циліндра описується рівнянням

$$P_n V_n + V_{b0} P_{b0} = P_k^* (V_n + V_{b0}), \quad (4.72)$$

де  $P_n$ ,  $V_n$  – початковий тиск та об’єм повітря в штоковій порожнині пневмоциліндра;  $P_{b0}$ ,  $V_{b0}$  – початковий тиск та об’єм повітря в акумуляторі,  $P_k^*$  – тиск, який встановлюється в штоковій порожнині пневмоциліндра після приєднання акумулятора.

Опускання пристрою захоплення з тарним вантажем з позиції I в позицію II на висоту  $b$  описується рівнянням

$$(m_i + m_s)gb = P_k^* (V_n + V_{b0}) \ln \frac{V_n + V_{b0}}{V_n + V_{b0} - Sb}, \quad (4.73)$$

де  $b$  – задане вертикальне переміщення тарного вантажу;  $m_i$  – маса тарного вантажу;  $m_s$  – зведена маса захоплюючого пристрою та рухомих частин у вертикальній площині мехатронного модуля укладання;  $i$  – кількість тарних вантажів в ряді.

Відповідно переміщення поршня циліндра на висоту  $b$  призводить до зменшення об’єму камери штокової порожнини:

$$V_k = V_n - Sb. \quad (4.74)$$

В кінці операції укладання тарного вантажу, тиск повітря в акумуляторі є досить великим, що призводить до збільшення опору витоку повітря зі штокової

порожнини циліндра  $i$ , як наслідок, до зменшення швидкості опускання. Для ліквідації даного недоліку система керування підключає подачу додаткового тиску повітря  $P_o$  у поршневу порожнину пневмоциліндра, що забезпечує додаткове зусилля опускання тарного вантажу. Відповідно тиск в пневматичній системі на кінець операції укладання:

$$P_i^* = \frac{P_{oy}(Sb - V_i) + (m_i + m_{nl})gb}{(V_i + V_{b1}) \ln \left( \frac{V_i + V_{b1}}{V_i + V_{b1} - Sb} \right)}. \quad (4.75)$$

З урахуванням виразу 4.75 об'єм повітря яке надійшло в акумулятор:

$$V_{ак} = \frac{\left( \frac{(m_i + m_s)g}{S} \right) (V_n - Sb)}{P_n - P_{b0}}. \quad (4.76)$$

Після закінчення операції укладання стиснене повітря з акумулятора потрапляє в штокову порожнину циліндра  $i$  пристрій захоплення підіймається в положення I. При цьому в штоковій порожнині пневмоциліндра створюється тиск  $P_{n1}$ . Для того, щоб знайти тиск у ресивері  $P_{bk}$  після того, як захоплюючий пристрій піднявся в положення I, запишемо вираз:

$$P_{n1} \cdot S \cdot b + V_{bo} \cdot P_k^* = P_{n1} \cdot S \cdot h + V_{bo} \cdot P_{bk}, \quad (4.77)$$

звідки

$$P_{bk} = \frac{P_k^* \cdot S \cdot b + V_{bo} \cdot P_k^* - P_{n1} \cdot S \cdot b}{V_{bo}}, \quad (4.78)$$

де  $P_{bk}$  – тиск у ресивері в кінці операції піднімання пристрою захоплення в початкове положення;  $P_k^*$  – тиск в ресивері після закінчення операції укладання тарного вантажу;  $P_{n1}$  – тиск в циліндрі в кінці операції піднімання пристрою захоплення в початкове положення;  $P_{0.1}^*$  – тиск в циліндрі після закінчення операції укладання транспортного пакету;  $S$  – площа торця поршня пневматичного циліндра;  $b$  – хід штока пневмоциліндра.

Якщо знехтувати аеродинамічним опором то укладання тарних вантажів мехатронним модулем представляє собою динамічну систему, яка описується рівнянням руху:

$$(m_i + m_3) \ddot{y}_1 = (m_i + m_3) g - F_T - F_{u(t)} + F_\delta, \quad (4.79)$$

де  $F_T$  – сила тертя між рухомими і нерухомими частинами направляючої платформи визначається з рівняння (4.50);  $m_i + m_3$  – зведена маса пристрою захоплення, тарного вантажу та рухомих елементів пневматичного приводу;  $F_{u(t)}$  – сила керування в пневмоциліндрі, яка створює опір переміщення зведеної маси під дією сил тяжіння;  $F_\delta$  – додаткове зусилля, яке виникає в наслідок подачі тиску повітря  $P_{\delta y}$  в поршневу порожнину пневмоциліндра для компенсації дії протитиску повітря з акумулятора на швидкість опускання тарного вантажу. Траєкторія руху зведеної маси за час укладання  $t_n$  характеризується наявністю ділянок розгону  $t_p$  та гальмування  $t_r$ . Сила керування на етапі розгону визначається з рівняння (4.47), а на етапі гальмування з рівняння (4.51).

При цьому математична модель системи керування мехатронним модулем вертикального переміщення тарних вантажів з пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії, в якій забезпечується фізичний контроль координати переміщення тарного вантажу та тиску в порожнинах пневмоциліндра, описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} (m_i + m_3) \ddot{y} = (m_i + m_3) g - F_T - F_{u(t)} + F_\delta; \\ \dot{F}_u = c_x \cdot (\bar{k}_p \cdot F_{u(t)} - k_{cm} \cdot k_\beta \cdot U_y - \dot{y}); \\ \bar{k}_p = f_0 \cdot \frac{y^* \cdot k_G}{S \cdot P_i} + k_{cm} \cdot k_y \cdot k_\beta \cdot k_F; \\ U_y = k_y \cdot U_p; \\ U_p = k_1 \cdot (\bar{y} - y) - k_2 \cdot \dot{y} - k_3 \cdot \ddot{y}. \end{cases} \quad (4.80)$$

Послідовність операцій проведення структурного синтезу мехатронного модуля формування транспортного пакету з пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії показана у вигляді блок-схеми рис. 4.16.

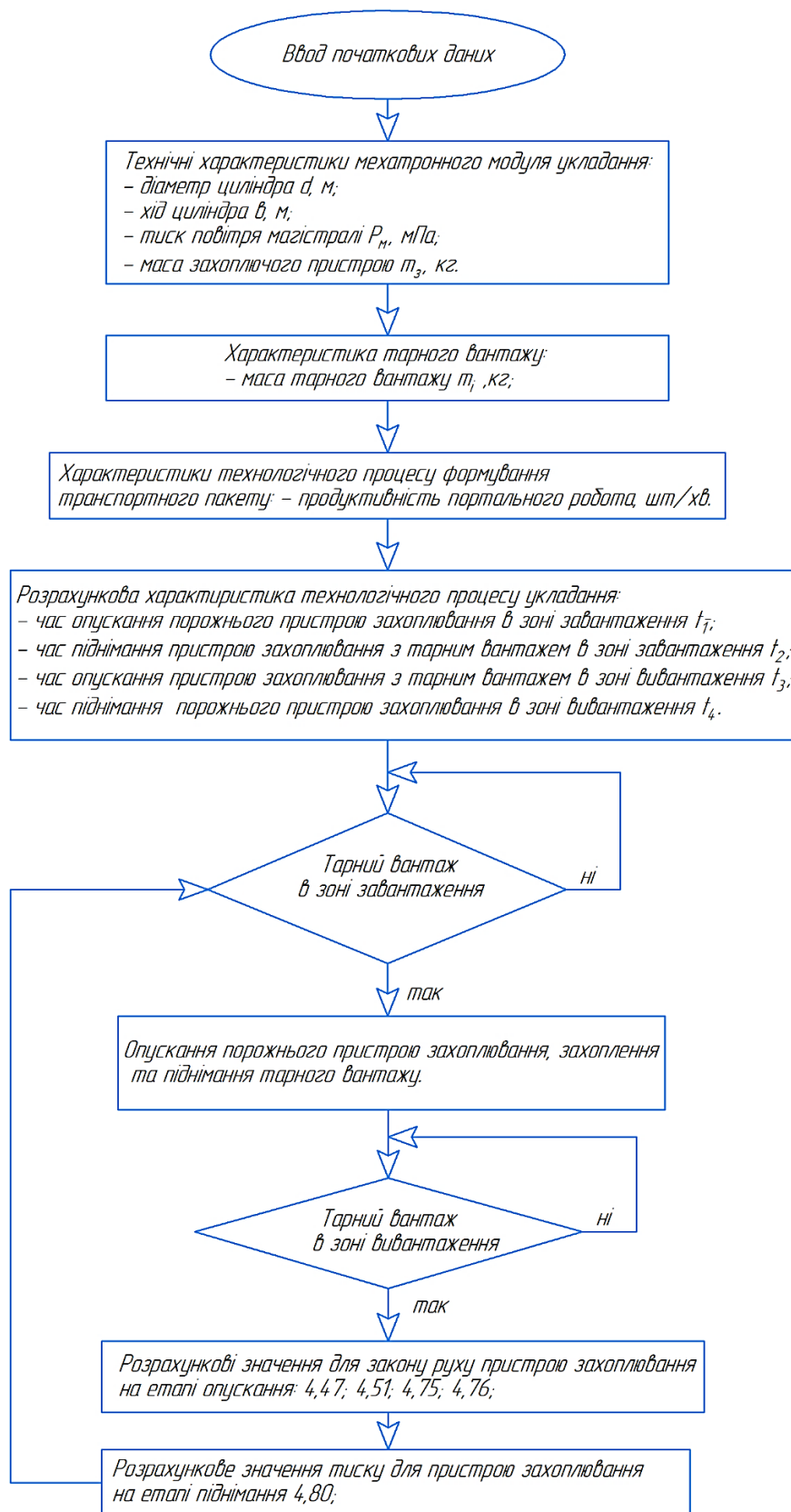


Рис.4.16. Блок-схема параметричного синтезу функціонально-мехатронного модуля з пневматичним приводом для укладання тарного вантажу на основі отриманих зв'язків між технологічними параметрами укладання тарного вантажу, системою керуючих сигналів та функцією рекуперації енергії.

Результати аналітичного дослідження щодо величини заощадження енергії у вигляді витрат стисненого повітря для операції укладання одиничного тарного вантажу запропонованою схемою функціонально-мехатронного модуля з пневматичним приводом (рис.4.14) представлені в таблиці 4.1. Основні характеристики мехатронного модуля: діаметр пневмоциліндра 0,04м, переміщення захоплюючого пристрою 0,35 м, тиск повітря керування 0,6 МПа, маса тарного вантажу 20 кг. Кількість тарних вантажів в шарі 8 штук. Для розрахунку була використана методика визначення витрат повітря для пневмоциліндра, яка наведена в роботах [58 – 80].

Таблиця 4.1

**Споживання стисненого повітря на укладання одиничного тарного вантажу типовою та запропонованою конструкціями функціонально-мехатронного модуля**

Вид руху захоплюючого пристрою	Споживання стисненого повітря. л	
	<i>Типова конструкція</i>	<i>Запропонована конструкція з функцією енергозбереження</i>
Опускання порожнього захоплюючого пристрою в зоні захоплення	1,4	1.4
Піднімання пристрою захоплюючого з тарним вантажем в зоні захоплення	1,31	1,31
Опускання пристрою захоплюючого з тарним вантажем в зоні вивантаження	1,4	0,8 + (потенціальна енергія зведеної маси тарного вантажу та захоплюючого пристрою)
Піднімання порожнього пристрою захоплюючого в зоні вивантаження	1,31	– (енергія стисненого повітря, рекуперація якої відбулася на технологічній операції опускання тарного вантажу в зоні вивантаження)
<b>Всього</b>	5.42	3,51

Розрахункові витрати стисненого повітря за годину при відомій продуктивності функціонального мехатронного модуля укладання для типової конструкції становлять  $5,2 \text{ м}^3/\text{год}$ , для запропонованої конструкції -  $3,4 \text{ м}^3/\text{год}$ . Таким чином запропонована конструкція функціонального мехатронного модуля з пневматичним приводом для укладання тарного вантажу заощаджує до 35% енергії стисненого повітря в процесі формування шарів з тарних вантажів.

#### 4.3 Параметричний синтез функціонально-мехатронного модуля з електромеханічним приводом для горизонтального переміщення тарного вантажу

Функціональний модуль горизонтального переміщення тарного вантажу є типовою конструкцією робототехнічного комплексу формування транспортної пакети (таблиця 1.4). Традиційно функціональний мехатронний модуль горизонтального переміщення тарного вантажу (рис.4.17,а) складається з рухомої каретки 1 на якій закріплений виконавчий пристрій вертикального переміщення 2. Рух каретки відбувається по напрямних 3 за допомогою привода 4. Приводом модуля горизонтального переміщення є переважно електричний сервопривод, рідше застосовується пневматичний привод.

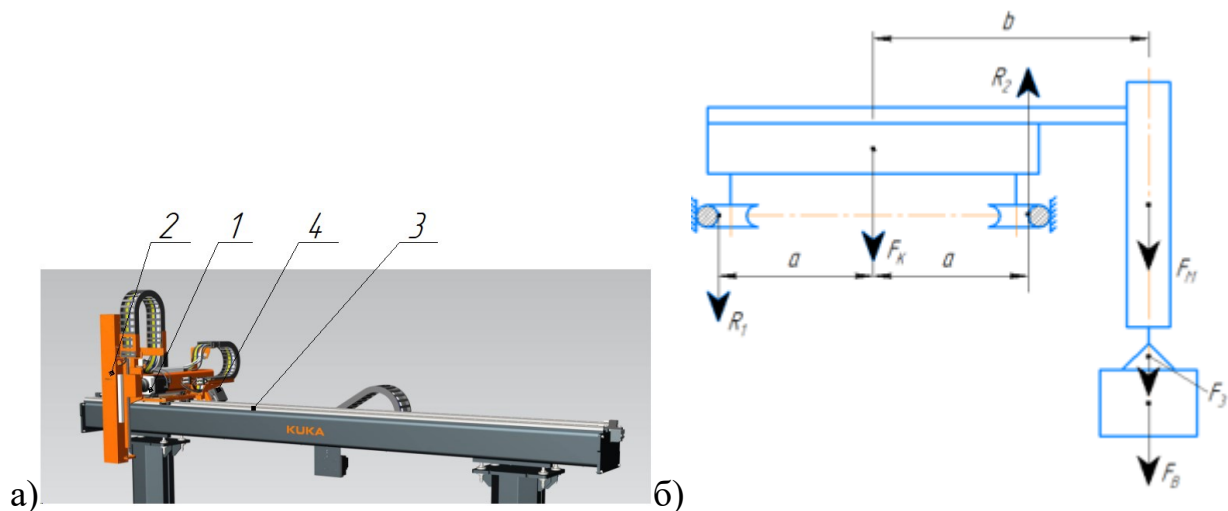


Рис.4.17 Схеми функціонального мехатронного модуля горизонтального переміщення тарного вантажу: а – технологічна; б – розрахункова:

$F_m$  – вага мехатронного модуля вертикального переміщення, який закріплений на картдці;  $F_k$  – вага каретки;  $F_g$  – вага тарного вантажу;  $F_3$  – вага захоплюючого

пристрою;  $R_1, R_2$  – реакції в зоні контакту напрямних з роликками каретки.

Для отримання лінійного руху робочих органів сервопривод додаткового комплектується пристроєм перетворення обертального руху вала електродвигуна в поступальний рух робочого органу – каретки. Сучасні конструкції таких пристроїв виробники називають «осей». Робочим елементом «осей» є зубчастий пас, який через систему шківів передає крутний момент від валу електродвигуна на каретку.

Тривалість виконання технологічних операцій горизонтального переміщення тарного вантажу залежить від конструктивних особливостей каретки та її напрямних, зведеної маси рухомих частин (захоплюючого пристрою та тарного вантажу) мехатронного модуля горизонтального переміщення. Маса та габарити тарного вантажу можуть бути змінними в разі використання харчовим підприємством іншого типорозміру тари.

До нових конструкцій мехатронних модулів з електричним приводом для горизонтального переміщення тарного вантажу висуваються додаткові умови серед яких, забезпечення високої швидкодії та впровадження технологій енергозбереження. Вирішити поставлену задачу можливо шляхом зменшення енергоспоживання електродвигуном за рахунок впровадження в його систему керування функції відслідковування силових параметрів у режимі реального часу та тривалості виконання технологічного процесу переміщення тарного вантажу. До таких параметрів відносяться крутний момент.

Із аналізу режимів налаштування систем керування мехатронних модулів з електричним приводом можна зробити висновок, що сервопривод має можливість забезпечувати заданий крутний момент. Для реалізації такого режиму в мехатронному модулі горизонтального переміщення тарного вантажу необхідно розробити математичну модель для визначення крутного моменту на валу серводвигуна та часу виконання технологічної операції переміщення.

Типовий цикл переміщення тарного вантажу за заданим законом руху має ділянки прискореного руху (розгону), сталого руху та гальмування. Відповідно до конструкції мехатронного модуля горизонтального переміщення тарного вантажу вихідними даними для розрахунку є :  $m_k$  – зведена маса каретки мехатронного модуля горизонтального переміщення;  $m_m$  – зведена маса мехатронного модуля вертикального переміщення, який закріплений на каретці;  $m_z$  – зведена маса пристрою захоплювання;  $m_e$  – маса тарного вантажу;  $a$  – відстань між роликотпорами;  $b$  – відстань між центрами мас каретки та модуля вертикального переміщення. Структура електричного привода мехатронного модуля горизонтального переміщення включає мотор-редуктор на валу якого закріплений приводний шків зубчатого пасу, який передає рушійну силу для переміщення каретки. Розрахункова схема силових характеристик, які діють на каретку мехатронного модуля горизонтального переміщення наведена на рис. 4.18 .

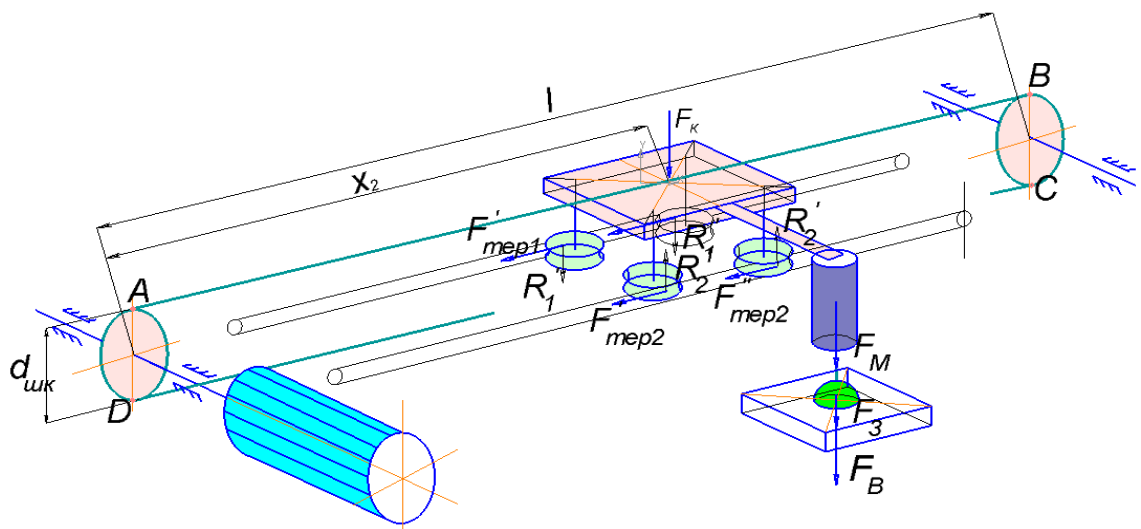


Рис. 4.18. Розрахункова схема силових характеристик на каретку мехатронного модуля горизонтального переміщення тарного вантажу

За відомих значень мас відповідних елементів визначаємо їх сили ваги:

$F_k$  – каретки мехатронного модуля горизонтального переміщення;  $F_m$  –

мехатронного модуля вертикального переміщення, який закріплений на каретці;  $F_3$  – пристрою захоплювання;  $F_6$  – тарного вантажу. Тоді результуюча сила, що діє на роликоопори каретки з боку мехатронного модуля горизонтального переміщення тарного вантажу, становить:

$$F_2 = F_k + F_m + F_3 + F_6 \quad (4.81)$$

Для визначення характеристики зміни крутного моменту на валу електродвигуна представимо горизонтальне переміщення каретки серводвигуном у вигляді двомасової моделі, маси якої рухаються поступально. Перша маса відтворює роботу рухомих елементів привода: ротора серводвигуна, зубчатих колес редуктора та приводного шківів:

$$m_1 = \frac{4}{d_{шк}^2} (I_p \cdot i_{ред}^2 + I_{шк}) \quad (4.82)$$

де,  $I_p$  – момент інерції ротора серводвигуна. 1/с;  $I_{шк}$  – момент інерції ведучого шківів, кг м<sup>2</sup>;  $d_{шк}$  – діаметр ведучого шківів. м.

Друга маса характеризує рухомі елементи механізму горизонтального переміщення каретки з пристроями, які змонтовані на каретці (мехатронний модуль вертикального переміщення; захоплюючий пристрій):

$$m_2 = m_k + m_m + m_3 + m_6 \quad (4.83)$$

Рух каретки відбувається за допомогою чотирьох роликів, які розташовані попарно. Для подальшого дослідження приймемо припущення, що розподілення зусилля на них є однаковими:

$$R_1^I = R_1^{II} = \frac{R_1}{2}; \quad R_2^I = R_2^{II} = \frac{R_2}{2} \quad (4.84)$$

Визначимо реакції  $R_1$  та  $R_2$  в зоні контакту роликів з напрямними:

$$R_1 = \frac{F_2(a+b) - F_k a}{2a}; \quad R_2 = \frac{F_k + F_2(a+b)}{2a} \quad (4.85)$$

За відомих значень реакцій розрахуємо сили тертя під час руху каретки в

горизонтальній площині з урахуванням складної конструкції роликоопор:

$$F_{мер1} = R_1 \left( \frac{2\mu + fd_0}{d_p} \right) \beta; \quad F_{мер2} = R_2 \left( \frac{2\mu + fd_0}{d_p} \right) \beta, \quad (4.86)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт тертя кочення між твірною ролика та напрямною;  $f$  – коефіцієнт тертя ковзання в опорах роликів;  $d_p$  – діаметр ролика;  $d_0$  – діаметр опори ролика;  $\beta$  – коефіцієнт, який враховує форму напрямної опори ( $\beta > 1$ ).

Рушійна сила, яку створює серводвигун, приведена до приводного шківів (точка А, рис. 4.18), визначається як:

$$F_p = \frac{2M_{дв} \cdot i_{ред} \cdot \eta_{пр}}{d_{шк}} , \quad (4.87)$$

де,  $M_{дв}$  – момент створений електродвигуном, Н м;  $\eta_{пр}$  – ККД привода.

Передача рушійної сили на каретку мехатронного модуля відбувається за допомогою зубчасто-пасової передачі. Жорсткість паса, як гнучкої ланки визначаємо:

$$C_p = \frac{E_n \cdot S_n}{x_0 + l_{роб}} , \quad (4.88)$$

де,  $E_n$  – модуль пружності I роду для матеріалу паса (Н/мм<sup>2</sup>);  $S_n$  – площа поперечного перерізу паса, мм<sup>2</sup>;  $x_0$  – відстань від центру шківів до початкового положення каретки, мм;  $l_{роб}$  – довжина робочого ходу каретки, мм. Розглянемо технологічну операцію переміщення тарного вантажу кареткою мехатронного модуля в горизонтальній площині, яка складається з етапу розгону та гальмування. Рівняння руху мас  $m_1$  та  $m_2$  на етапі розгону має вигляд:

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + (x_1 - x_2) C_p = F_p; \\ m_2 f \left( \frac{d^2 x_2}{dt^2} \right) - (x_1 - x_2) C_p = -F_o, \end{cases} \quad (4.89)$$

де,  $f\left(\frac{d^2x_2}{dt^2}\right)$  функція заданого закону руху для маси  $m_2$ . Початковими умовами даної складової руху є:  $t = 0; \quad x_1(t) = 0; \quad \dot{x}_1(t) = 0; \quad x_2(t) = 0; \quad \dot{x}_2(t) = 0$   
 Кінцева умова етапу розгону:  $\ddot{x}_2(t) = W_{\max}$ . Рівняння руху мас  $m_1$  та  $m_2$  на етапі гальмування має вигляд:

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2x_1}{dt^2} + (x_1 - x_2)C_p = F_r; \\ m_2 f\left(\frac{d^2x_2}{dt^2}\right) - (x_1 - x_2)C_p = F_o. \end{cases} \quad (4.90)$$

Початковими умовами цього етапу руху є:  $t = t_I; \quad x_1(t) = x_{1(I)}; \quad \dot{x}_1(t) = \dot{x}_{1(I)}; \quad x_2(t) = x_{2(I)}; \quad \dot{x}_2(t) = \dot{x}_{2(I)}$ . Кінцевою умовою етапу гальмування є  $\ddot{x}_2(t) = 0$ . Оскільки розв'язок системи рівнянь (4.89) та (4.90) аналітично не є тривіальним тому для розв'язку використаємо відомі чисельні методи в середовищі MATLAB. Алгоритм розв'язку системи рівнянь (4.89) та (4.90) має наступну послідовність [150]:

1. Задамося початковими параметрами системи: масами  $m_1$  та  $m_2$ , силою опору, характеристиками привода, що відповідає реальній конструкції.
2. Задамося законом руху маси  $m_2$ .
3. Розв'яжемо систему рівнянь (4.89) та визначимо миттєві кінематичні характеристики руху першої та другої мас, рушійну силу та момент на роторі електродвигуна на етапі розгону.
4. Розв'яжемо систему рівнянь (4.90) та визначимо миттєві кінематичні характеристики руху першої та другої мас, рушійну силу та момент на роторі електродвигуна на етапі гальмування. Побудуємо графіки прискорення першої та другої мас, рушійної сили та моменту двигуна від часу.

Програма розрахунку зміни крутного моменту на валу електродвигуна під час переміщення каретки з тарним вантажем мехатронним модулем горизонтального перміщення наведено в додатку Б. Числові розрахунки

величини крутного моменту на роторі електродвигуна функціонально-мехатронного модуля горизонтального переміщення тарних вантажів визначимо на прикладі переміщення тарного вантажу масою 15 кг за синусоїдальним законом руху на відстань 300 мм. Загальна сила опору системи 180 Н, ккд привода = 0,9. Результати розрахунків наведено у вигляді графіків рис.4.19 – рис.4.21.

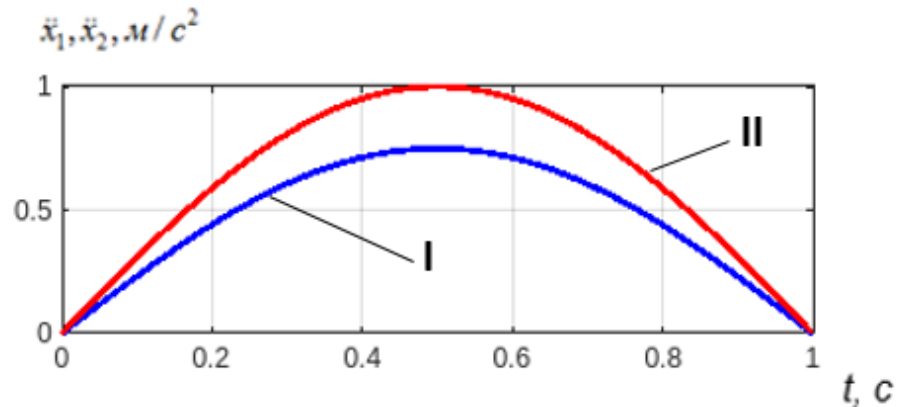


Рис. 4.19. Зміна прискорення руху першої зведеної маси в мехатронному модулі горизонтального переміщення з тарним вантажем при синусоїдальному законі руху каретки: I – перша маса 12 кг; II - друга маса 15 кг.

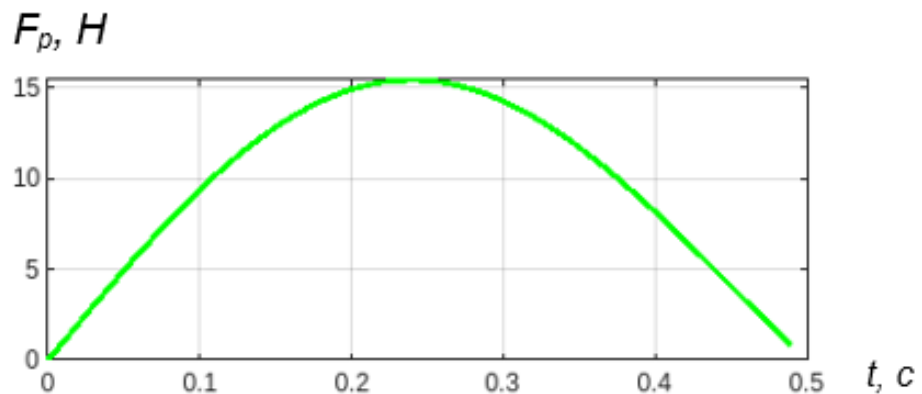


Рис. 4.20.Зміна рушійної сили на приводному шківу пасової передачі при горизонтальному переміщенні тарного вантажу масою 15 кг при синусоїдальному законі руху каретки.

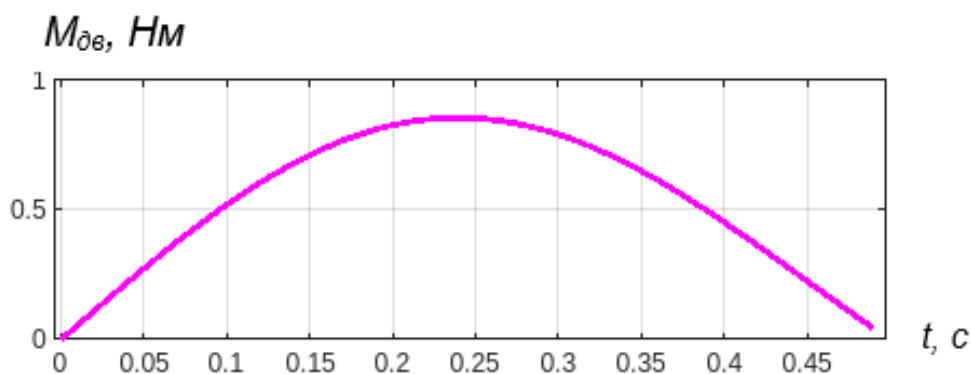


Рис. 4.21.Зміна крутного моменту на роторі серводвигуна при горизонтальному переміщенні тарного вантажу масою 15 кг за синусоїдальним законом руху каретки.

За результатами розрахунку математичної моделі руху каретки з тарним вантажем в горизонтальній площині (рис. 4.21) можна зробити висновок, що реалізація заданого закону руху каретки з тарним вантажем призводить до зміни силових параметрів мехатронної системи. Впровадження в систему керування функціонально-мехатронним модулем горизонтального переміщення тарного вантажу функції відслідковування рушійної сили (рис.4.20) та крутного моменту (рис. 4.21) в режимі реального часу зменшує сумарну потужність системи на виконання операції переміщення тарного вантажу та оптимізує тривалість виконання технологічного процесу шляхом реалізації заданих кінематичних та динамічних параметрів .

Таким чином на основі розроблених математичних моделей руху каретки з тарним вантажем за заданим законом функціонально-мехатронним модулем лінійного переміщення з електромеханічним приводом виконано оцінку його раціональних параметрів.

**4.4. Параметричний синтез та розробка системи керування функціонально-мехатронного модуля з вакуумним захоплювальним елементом та функцією енергозбереження для утримання тарного вантажу**

#### **4.4.1 Характерна конструктивна схема та принцип роботи функціонально-мехатронного модуля з вакуумним захоплювальним елементом та функцією енергозбереження для утримання тарного вантажу**

Тривалість виконання технологічних операцій формування транспортного пакету залежить від швидкості роботи пристроїв захоплювання тарних вантажів. Наразі основними вимогами сьогодення до нових конструкцій таких пристроїв є наявність у них системи керування та слідкування, яка забезпечує контроль зусилля утримання тарних вантажів при малих витратах енергії та високих значеннях кінематичних параметрів руху виконавчих пристроїв портального робота. Вирішити поставлену задачу можливо лише за умови відслідковування та керування в реальному часі змінну силових параметрів утримання тарних вантажів під час їх переміщення [146 - 156].

Основними конструктивними елементами в таких системах є вакуумні присмоктувачі. Надійне утримання тарних вантажів у вакуумних пристроях захоплювання відбувається контролем величини вакууму. На основі аналізу переваг і недоліків роботи вакуумних пристроїв захоплювання було запропоновано структурну схему керування мехатронним модулем з функцією енергозбереження для утримання тарних вантажів (рис. 4.22).

Тарний вантаж 1 утримується присмоктувачем 2 за рахунок вакууму, який створює ежектор 3 в каналі зворотного клапану 4 та фільтра очистки повітря 5. Контроль величини вакууму здійснюється датчиком вакууму 6. Керування ежектором 3 здійснюється розподільником 7 марки 2/2. Функцію енергозбереження стисненого повітря забезпечує розподільник 8, марки 2/2. Імпульс стисненого повітря для відриву тарного вантажу від присмоктувача забезпечує розподільник 9, марки 2/2, а величину надлишкового тиску імпульсу, контролює датчик 10. Зусилля імпульсу надлишкового тиску налаштовуються дроселем 11.

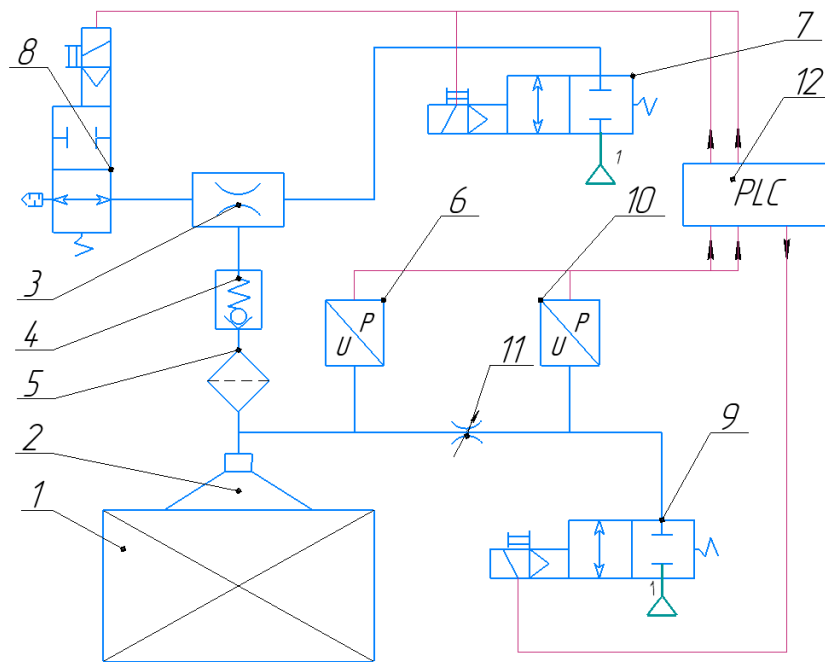


Рис. 4.22. Структурна схема керування функціонально-мехатронним модулем з вакуумним захоплювальним елементом та функцією енергозбереження для утримання тарного вантажу

Роботу функціонально-мехатронного модуля з вакуумним захоплювальним елементом та функцією енергозбереження для утримання тарного вантажу здійснює електронна система керування 12. Функціонально-мехатронний модуль з вакуумним захоплювальним елементом та функцією енергозбереження для утримання тарного вантажу працює наступним чином: після контакту присмоктувача 2 з поверхнею тарного вантажу 1 утворюється ущільнена камера, розміри якої обмежуються поверхнею тарного вантажу 1 та корпусом присмоктувача 2. Вмикається розподільник 7 і стиснене повітря з магістралі 13 подається на ежектор 3, який забезпечує розрідження (точка А, рис.4.24).

Величина розрідження в каналі зворотного клапану 4 та фільтра 5 попадає на присмоктувач 2. В камері присмоктувача 2 виникає зусилля утримання тарного вантажу, яке характеризується перепадом тиску між ущільненою камерою та навколишнім середовищем. В процесі створення розрідження ежектор всмоктує повітря з камери присмоктувача, очищене від твердих частинок фільтром 5 та відбувається операція захоплення тарного вантажу. Далі порталний робот починає наступну технологічну операцію його

перенесення. На початок операції перенесення тарного вантажу в мехатронному модулі з вакуумним захоплювальним елементом вмикається функція енергозбереження (вмикається розподільник 8 та вимикаються розподільник 7). Ежектор вимикається (точка В, рис.4.24). В результаті цього створюється закрыта порожнина між присмоктувачем 2 та ежектором 3 з заданою величиною вакууму, який дозволяє при виключеному ежекторі утримувати тарний вантаж. Контроль зміни величини вакууму в закритій порожнині здійснює датчик вакууму 10.

В разі зменшення величини вакууму до заданого мінімального значення (точка С, рис.4.24), знову включається ежектор 3 (вмикається розподільник 7 та вимикається розподільник 8) та збільшує величину вакууму до заданого максимального рівня (точка В, рис.4.24). Після переміщення тарного вантажу в координату розвантаження, вакуум генератор відключається (точка Д, рис.4.24) та відбувається відривання тарного вантажу від вакуумного присмоктувача. Циклограма роботи функціонально-мехатронного модуля з вакуумним захоплювальним елементом та функцією енергозбереження для утримання тарного вантажу показана на рис. 4.23.

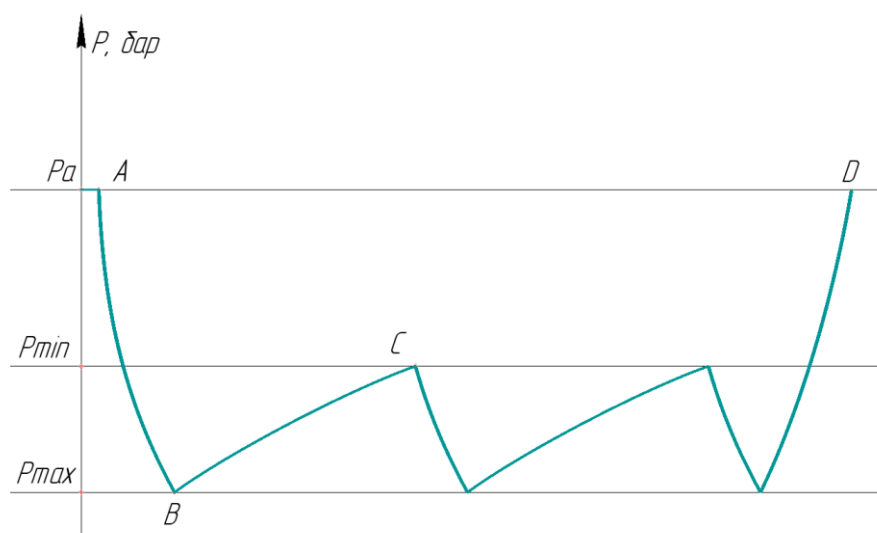


Рис. 4.23 Циклограма роботи функціонально-мехатронного модуля з вакуумним захоплювальним елементом та функцією енергозбереження для утримання тарного вантажу: А – початок процесу вакуумування; В – захоплення

та утримання присмоктувачем тарного вантажу з максимальною величиною вакууму; С – утримання присмоктувачем тарного вантажу з мінімальною величиною вакууму; D – відключення вакууму в присмоктувачі для відпускання тарного вантажу.

Після перенесення порталним роботом тарного вантажу в задану координату вакуум в захоплюючому пристрої відключається і вантаж відривається від присмоктувача. Зусилля відриву тарного вантажу характеризується його масою. Якщо зусилля відриву менше за статичні сили утримання, після виключення вакууму тарний вантаж залишається прикріплений до вакуумного захоплюючого пристрою. Явище «приклеювання» тарного вантажу до захоплюючого пристрою утворюється за рахунок дії статичних сил, які виникають в наслідок покриття робочого кільця присмоктувача електричнозарядженими частинками пилу та бруду. З метою надійного відриву тарного вантажу від присмоктувача в зоні вивантаження в системі керування передбачено функцію скидання. Примусовий відрив тарного вантажу відбувається за рахунок імпульсивної подачі стисненого повітря в захоплюючий пристрій 2 розподільником 9 та керуючим дроселем 11. Контроль за величиною надлишкового тиску та часом імпульсу відбувається датчиком тиску 10.

Для налаштування параметрів максимального та мінімального значення вакууму в мехатронному модулі необхідно попередньо визначити межі їх робочих величин в залежності від впливу зовнішніх факторів. Відомі методики розрахунку [158 -161] не можуть повноцінно бути використані для вакуумних систем з функцією енергозбереження, так як дають можливість визначити величину тільки максимального значення вакууму без аналізу впливу його коливань до мінімального значення на змінні зусилля утримання об'єкту. Тому існує нагальна потреба удосконалити існуючі методики визначення величини вакууму у вигляді аналізу меж його максимального та мінімального значення.

#### **4.4.2 Синтез системи керування функціонально-мехатронного модуля з вакуумним захоплювальним елементом для утримання тарного вантажу**

На роботу функціонально-мехатронного модуля з вакуумним захоплювальним елементом та функцією енергозбереження для утримання тарного вантажу впливають [1, 2, 45, 76, 159 - 162] фізико-механічні властивості матеріалу упаковки тарного вантажу, вид та тип матеріалу присмоктувача та спосіб його розташування відносно центру мас тарного вантажу.

За різних умов впливу зовнішніх факторів в процесі переміщення тарного вантажу енергетична складова на його утримання є різною.

Задачею досліджень є розробка математичної моделі для визначення енергетичних показників величини вакууму з метою налаштування вакуумних генераторів з функцією енергозбереження. Пропонується, що комплексний підхід для визначення мінімального значення вакуума виконується з умови перевірки утримання тарного вантажу вакуумним пристроєм захоплювання за трьома показниками експлуатаційних вимог під час виконання операції переміщення.

В математичній моделі приймемо припущення: тарний вантаж має картонну упаковку і розглядається як абсолютно жорстке тіло, в якому відсутні деформації; еластичний матеріал присмоктувача утворює пружний елемент, який під час підйому тарного вантажу впливає на зусилля утримання тарного вантажу в часі  $t$ .

I. На першому етапі розглянуто комплексну задачу визначення величини кінематичних характеристик руху пристрою захоплювання при перенесенні тарного вантажу в просторі для трьох випадків, коли напрямки сили ваги, інерції й опору зовнішнього середовища збігаються з осями координат переміщення тарного вантажу у вертикальній площині (операція піднімання); в горизонтальній площині (операція переміщення) та є суміщеними в часі.

За таких характеристик коливальну систему вакуумного пристрою захоплювання з тарним вантажем представлено у вигляді двомасової моделі, яка

складається із ведучої маси у вигляді зведеної маси елементів вакуумного привода з захоплюючою головкою  $m_1$  та маси – тарного вантажу  $m_2$ , з'єднаних пружним матеріалом присмоктувача, що має жорсткість  $C_{12}$  та зведеної сили опору  $F_{on}$ .

Вирішення задачі піднімання тарного вантажу вакуумним пристроєм захоплювання наведено в роботах [ ] і має вигляд:

$$\begin{cases} \ddot{y}_2 = \frac{1}{m_2} (C_{12} (\mathcal{Q}_1 t - y_2) + b_{12} (\mathcal{Q}_1 - \dot{y}_2) - F_{on}) \\ b_{12} \dot{y}_2 + C_{12} y_2 = C_{12} \mathcal{Q}_1 t + b_{12} v_1 - P_p \end{cases}, \quad (4.91)$$

де,  $\dot{y}_1 = \mathcal{Q}_1 = const$  - величина швидкості.

Вирішення задачі переміщення тарного вантажу в горизонтальній площині вакуумним пристроєм захоплювання наведено в роботах [ ] і має вигляд :

$$\ddot{x}_2 = -\frac{F''_{on}}{m'_2} + C''_{12} \left( \mathcal{Q}_2 t - \mathcal{Q}_2 t + \frac{P_p}{C_{12}} \right) \frac{1}{m'_2} = \frac{P_p - F'_{on}}{m'_2}. \quad (4.92)$$

Для збільшення продуктивності робототехнічних комплексів суміщають рухи переміщення тарного вантажу у вертикальній та горизонтальній площинах. Тоді величина прискорення маси  $m_2$  знаходиться шляхом підстановки рівнянь (4.91) та (4.92) в формулу:

$$\ddot{S} = \sqrt{\ddot{x}_2^2 + \ddot{y}_2^2}. \quad (4.93)$$

Показником експлуатаційних вимог є визначення величини вакууму на утримання тарного вантажу в процесі його піднімання при дії зовнішніх сил за умови відомого діаметра присмоктувача  $D$  та геометричних розмірів тарного вантажу  $h \times l$ .

Вектор прискорення, швидкості та переміщення тарного вантажу знаходиться під кутом  $\alpha$  до горизонтальної площини. В процесі переміщення тарного вантажу на нього діють сили, які прагнуть відірвати або зрушити його відносно присмоктувача. Це сила тяжіння  $G$  тарного вантажу та присмоктувача, сили інерції  $F_{in}$ , сила опору повітря  $W_{in}$ , сила ковзання між поверхнею тарного вантажу та присмоктувачем  $F_{\kappa}$ .

II. Теоретична сила утримання тарного вантажу за умови відомих геометричних розмірів присмоктувача визначається:

$$P_{\tau} = \frac{\pi D^2}{4} (P_1 - P_2), \quad (4.94)$$

де,  $P_1, P_2$  – відповідно атмосферне та абсолютне значення тисків повітря в камері присмоктувача.

Рівняння (4.94) характеризує силу утримання як складову двох факторів: ефективну площу контакту присмоктувача до поверхні тарного вантажу  $f_e = \frac{\pi D^2}{4}$  та величину вакууму в камері присмоктувача, який при практичній експлуатації має менше значення з урахуванням пористої структури (коефіцієнта повітропроникності) пакувального матеріалу тарного вантажу. В подальшому цей вплив будемо враховувати технологічним коефіцієнтом експлуатації  $k_1$ . Тоді величина вакууму з урахуванням умов експлуатації присмоктувача:

$$\Delta P = (P_1 - P_2) = \frac{k_2 ((F_{in} + W_n) \sin \alpha + G)}{k_1 \cdot f_{ex}}, \quad (4.95)$$

де,  $\alpha$  – кут нахилу вектора прискорення, швидкості та переміщення тарного вантажу до горизонтальної площини;  $G$  – сила тяжіння тарного вантажу з присмоктувачем;  $F_{in}$  – сила інерції;  $W_n$  – сила опору повітря;  $f_e$  – площа контакту присмоктувача на поверхні тарного вантажу;  $k_1$  – технологічний коефіцієнт експлуатації.

II Дотримання показника експлуатаційних вимог є відсутність явища зсуву тарного вантажу від вакуумного пристрою захоплення в процесі його горизонтального переміщення. Якщо врахувати, що висота тарного вантажу  $h$  є великою, то в процесі його переміщення в горизонтальній площині може виникнути явище зсуву поверхні утримання відносно присмоктувача в наслідок дії сил опору:

$$F_c > (F_{in} + W_n) \cos \alpha. \quad (4.96)$$

З іншої сторони на величину зусилля зсуву тарного вантажу від присмоктувача під час його транспортування суттєво впливає стан поверхні контакту, який можна представити значенням коефіцієнта тертя:

$$F_c = \mu \left( P_{np} - (F_{in} + W_n) \sin \alpha - G \right) = \mu \left( P_{np} - \frac{P_{np}}{k_4} \right) = \mu k_1 f_e (P_1 - P_2) \left( 1 - \frac{1}{k_4} \right), \quad (4.97)$$

де,  $\mu$  – коефіцієнт тертя між кромкою присмоктувача та поверхнею упаковки;  
 $k_4$  – коефіцієнт впливу сил опору.

Значення коефіцієнту тертя між кромкою присмоктувача та поверхнею упаковки залежить від додаткових факторів (наприклад повітропроникності пакувального матеріалу тарного вантажу) і є вагомим фактором впливу на величини вакууму в присмоктувачі і як наслідок, на зусилля зсуву. Для врахування такого впливу в математичній моделі визначення вакууму запропоновано використовувати результатами експериментальних досліджень:

$$\Delta P = (P_1 - P_2) = \frac{y(F_{зч})}{\mu k_1 f_e \left( 1 - \frac{1}{k_4} \right)}, \quad (4.98)$$

де,  $y(F_{зч})$  - експериментальні залежності зміни зусилля зчеплення тарного вантажу від величини діаметра присмоктувача для пакувальних матеріалів тарних вантажів наведено у вигляді рівнянь апроксимації:

- ✓ для марки МО:  $y(F_{зч}) = 0,008d^2 - 0,61d + 10,5$  і  $R^2=1$ ;
- ✓ для марки ММ:  $y(F_{зч}) = 0,008d^2 - 0,53d + 11,8$  і  $R^2=1$ ;
- ✓ для марки Н:  $y(F_{зч}) = 0,008d^2 - 0,529d + 11,1$  і  $R^2=1$ ;
- ✓ для марки НМ:  $y(F_{зч}) = 0,008d^2 - 0,424d + 9,9$  і  $R^2=1$ .

III Забезпечення виконання показника експлуатаційних вимог є відсутність явища відриву тарного вантажу від вакуумного пристрою захоплювання за умови додаткового впливу моментів в процесі його переміщення. Процес надійного утримання тарного вантажу характеризується якісним контактом присмоктувача до поверхні захоплення, який можна охарактеризувати графіком розподілення його тиску на поверхню контакту [ 45 ].

Умова надійного контакту присмоктувача з поверхнею тарного вантажу має вигляд:

$$q < [q], \quad (4.99)$$

де  $[q]$  - допустимий тиск.

За умови, що руйнування контакту між присмоктувачем та поверхнею упаковки буде характеризувати початок процесу відриву, який почнеться за умови  $q = 0$  визначимо величину вакууму [45]:

$$\Delta P = (P_1 - P_2) = \frac{(F_{in} + W_n) \cos \alpha \cdot \frac{h}{2} \cdot k_5}{k_1 \cdot I_r} \cdot \frac{D}{2}, \quad (4.100)$$

де,  $k_5$  - коефіцієнт безпеки при дії відривних моментів, в галузевому машинобудуванні приймається 2.

Отримані показники експлуатаційних вимог (4.95), (4.98) та (4.100) складають комплексну методику визначення мінімального вакууму та розраховується за різних умов кінематичних характеристик переміщення тарного вантажу вакуумним пристроєм захоплення.

Розв'язок рівнянь (4.95), (4.98) та (4.100)) дає можливість одержати найбільше значення вакууму за відомих кінематичних параметрів переміщення тарного вантажу:

$$\left. \begin{array}{l} 1: \ddot{S} = \max \\ \dot{S} = g_0 \\ 2: \ddot{S} = a \\ \dot{S} = \max \\ 3: \ddot{S} = \max \\ \dot{S} = \max \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta P_{\max} \quad (4.101)$$

Використання наведеної методики визначення величини максимального та мінімального значень вакууму розглянемо на прикладі формування шести шарового транспортного пакету із тарних вантажів за допомогою мехатронного модуля вакуумного пристрою захоплення.

Одиничний тарний вантаж прямокутної форми 400x300x300мм масою 25 кг переміщається порталним роботом у двох площинах. У вертикальній площині переміщення здійснюється мехатронним модулем з пневматичним приводом з прискоренням 5 м/с<sup>2</sup>; в горизонтальній площині переміщення здійснюється мехатронним модулем з електричним приводом з прискоренням 8 м/с<sup>2</sup>; коефіцієнт тертя між кромкою присмоктувача та упаковкою 0,5; коефіцієнт експлуатації – 0,9; коефіцієнт безпеки під час переміщення тарного вантажу - 1,5.

Вакуумний присмоктувач марки SAF 125 компанії J. Schmalz GmbH має діаметр робочої кромки 118 мм. Результати математичного розрахунку величини вакууму для функціонально-мехатронного модуля з вакуумним захоплювальним елементом для утримання тарного вантажу представлені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

**Розрахункові значення максимального та мінімального вакууму для мехатронного модуля вакуумного захоплюючого пристрою тарних вантажів з функцією енергозбереження**

Показник вимог експлуатації	Математичні моделі	Розрахункові значення вакууму, Па	Прийняті значення вакууму, Па (бар)	Межі регулювання
I	$\Delta P = (P_1 - P_2) = \frac{k_2((F_{in} + W_n) \sin \alpha + G)}{k_1 \cdot f_{ex}}$	57 575	57 000 (-0,43)	$P_{Max}$
II	$\Delta P = (P_1 - P_2) = \frac{y(F_{zu})}{\mu k_1 f_e \left(1 - \frac{1}{k_4}\right)}$	68 799	68 000 (-0,32)	$P_{Min}$
III	$\Delta P = (P_1 - P_2) = \frac{(F_{in} + W_n) \cos \alpha \cdot \frac{h}{2} \cdot k_5}{k_1 \cdot I_r} \cdot \frac{99}{2}$	99 967	–	–

Блок-схема визначення максимального та мінімального значення величин вакууму з метою налаштування вакуумних генераторів з функцією енергозбереження. Наведена на рис. 4.24.

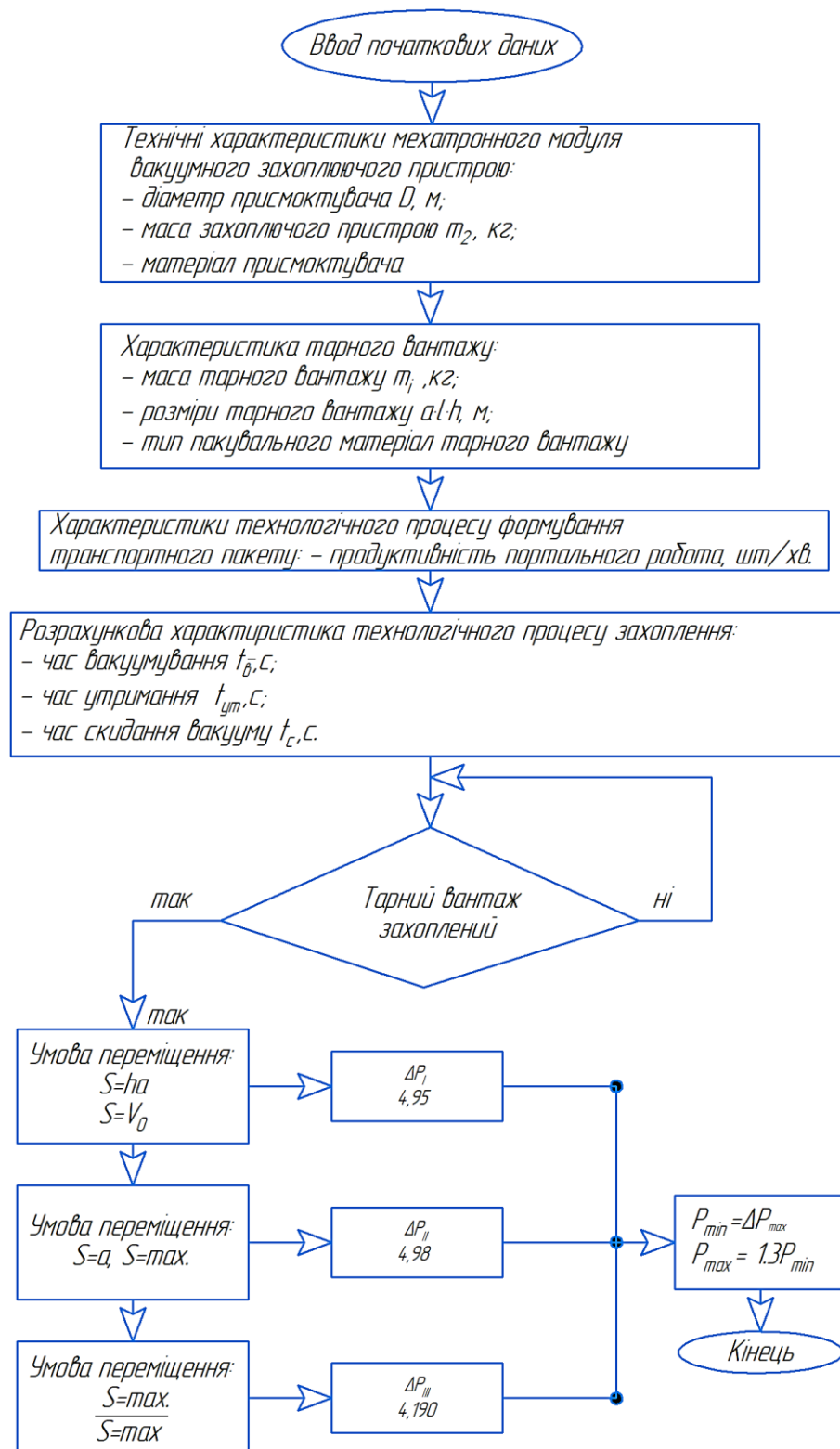


Рис.4.24. Блок-схема параметричного синтезу функціонально-мехатронного вакуумного захоплюючого пристрою для тарних вантажів

## Висновки до розділу IV.

1. Обґрунтовано вибір раціональної схеми формування транспортного пакету порталним роботом за критерієм енергетичних витрат (рис. 4.4). Встановлено взаємозв'язок між витратами енергії порталного робота на формування одиничного транспортного пакету та траєкторією руху його робочих органів. Аналітично визначено, що різниця між споживанням енергії на формування транспортного пакету за типовою схемою (рис. 4.2) та запропонованою схемою (рис. 4.4) зменшилось в 1,4 рази.

2. Запропоновано нову конструкцію функціонально-мехатронного модуля покрокового переміщення платформи формування структурних елементів транспортного пакету з пневматичним приводом, що має пневматичний рекуператор енергії (рис.4.6).

3. Розроблено методику визначення керуючого сигналу по зусиллю в пневмоциліндрі функціонально-мехатронного модуля покрокового переміщення платформи для формування структурних елементів транспортного пакету за умови забезпечення точності позиціонування платформи (рис. 4.13).

4. Запропоновано нову конструкцію функціонального мехатронного модуля із пневматичним приводом для укладання тарного вантажу, що має функцію рекуперації енергії (рис.4.15). Аналітично визначено, що споживання енергії на формування шару тарних вантажів за запропонованою схемою зменшилось на 35%..

5. Удосконалено структуру керування мехатронним модулем вакуумного захоплюючого пристрою для тарного вантажу, яка поєднує конструкцію вакуумного приводу з функціональними елементами керування на основі запропонованих логічних зв'язків їх функціональних областей з урахуванням додаткових можливостей енергозбереження (рис. 4.22).

6. Розроблено математичну модель для визначення енергетичних показників величини вакууму з метою налаштування вакуумних генераторів з функцією енергозбереження. Запропоновано комплексний підхід для визначення мінімального та максимального значень вакууму з умови якісного утримання

тарного вантажу вакуумним захоплючим пристроєм за трьома показниками експлуатаційних вимог під час виконання операції переміщення (рис.4.24).

7. На основі розроблених аналітичних залежностей для визначення тривалості виконання технологічної операції переміщення тарного вантажу за заданим законом руху виконано оцінку раціональних параметрів функціонально-мехатронного модуля лінійного переміщення з електромеханічним приводом, що дає змогу зменшити сумарну потужність привода.

## **РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОСНОВНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНО-МЕХАТРОННИХ МОДУЛІВ РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ ФОРМУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПАКЕТІВ ІЗ ХАРЧОВИМИ ПРОДУКТАМИ**

### **5.1 Дослідження функціонально-мехатронного модуля покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії для формування структурних елементів транспортного пакету**

Методика проведення досліджень та опис експериментальної установки наведені в розділі 2 (підрозділ 2.3, рис. 2.1 – рис. 2.10). Дослідження технічних та технологічних характеристик роботи функціонально-мехатронного модуля покрокового переміщення платформи формування структурних елементів транспортного пакету з пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії проводилися для мас шарів: 10, 20 та 25 кг. Маса платформи з рухомими частинами пристрою вертикального переміщення в функціонально-мехатронному модулі складає 15 кг. Структурний елемент транспортного пакету створювався з покрокового укладання шарів, один на одного, шляхом опускання платформи у вертикальній площині. Визначення кількості повторів проведення експерименту будувалося на прийнятому припущенні про нормальний закон розподілення похибок вимірювання за методикою [150]. Розрахункова кількість повторів в експерименті прийнято  $n=5$ .

На першому етапі експериментального дослідження розглянуто опускання платформи під дією ваги структурного елемента транспортного пакету без підключення рекуператора енергії відповідно до математичної моделі (4.22 – 4.28). Мета дослідження – визначити вплив зміни тиску в нижній порожнині пневмоциліндра на кінематичні параметри руху (рис.5.1), Дослідження проводилися для шарів тарних вантажів масою 10 кг (рис.5.1) та 20 кг (рис.5.2), діаметр циліндра 40 мм, крок переміщення платформи становив 195 мм, об'єм нижньої порожнини пневмоциліндра  $0,0005 \text{ м}^3$ ; зведена маса рухомих частин платформи 15 кг. З рівняння (4.22) визначили величину тиску  $P_1$  в нижній порожнині пневмоциліндра на початок першого кроку опускання платформи: для

шару тарних вантажів 10 кг менше 2 бари (0,2МПа); для шару тарних вантажів 20 кг менше 2,5 бари (0,25МПа). Результати експериментальних досліджень наведені на рис.5.1 та рис.5.2.

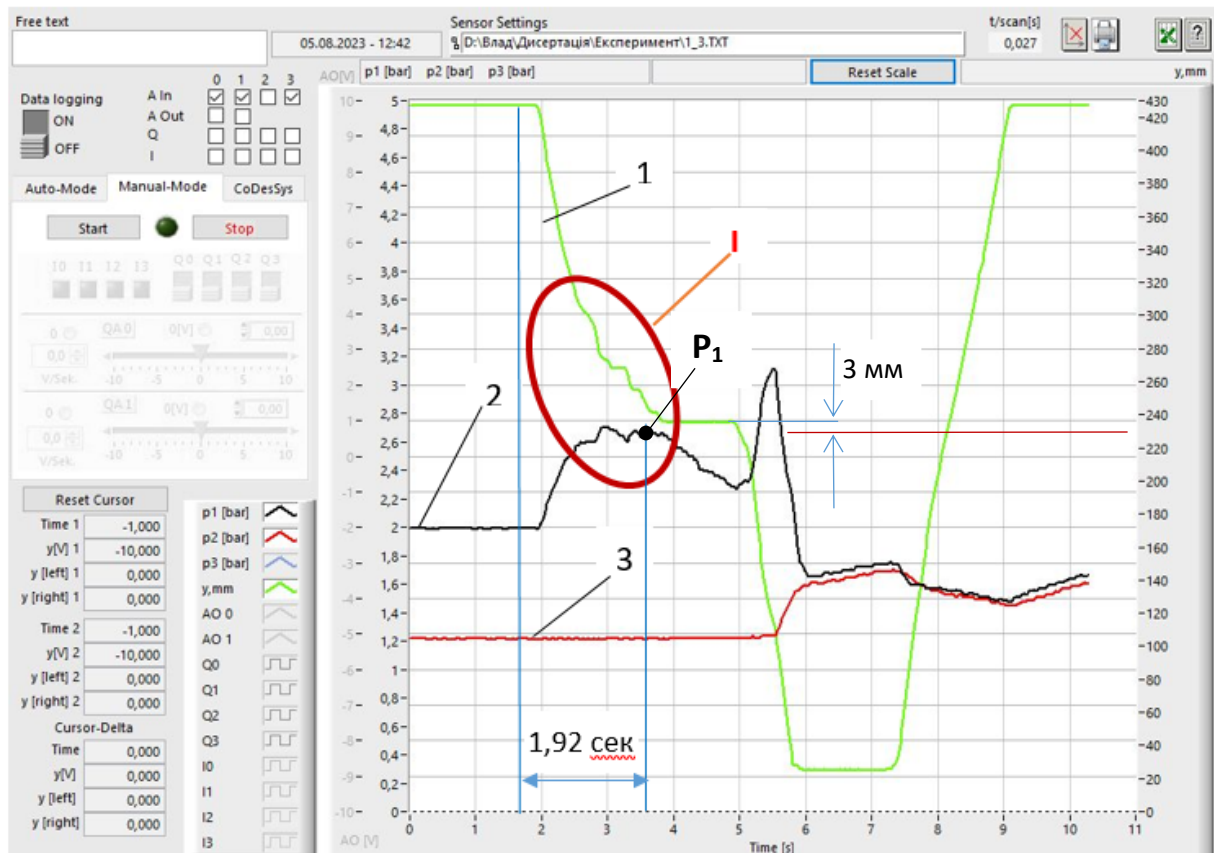


Рис. 5.1 Зміна координати платформи та тиску в порожнині пневмоциліндра під час виконання операції покрокового переміщення шарів вантажів (без підключення рекуператора енергії для першого шару) при початкових умовах: зведена маса рухомих частин платформи  $m_{nn} = 15$  кг; зведена маса шару тарних вантажів  $m_i = 10$  кг; початковий тиск повітря в нижній порожнині циліндра 2 бар; початковому тиску повітря в ресивері рекуператора 1,22 бари (0,122МПа); 1 – координата переміщення платформи з шарами тарних вантажів; 2 – зміна тиску в нижній порожнині пневматичного циліндра; 3 – зміна тиску в ресивері рекуператора.

Порівняльні результати експериментального (середнє значення тиску  $P_1$  на графіках рис. 5.1 та рис.5.2) та теоретичного досліджень (4.28) тиску в нижній порожнині пневмоциліндра на кінець першого кроку опускання платформи для

зведених мас 10 кг та 20 кг наведено в таблиці 5.1.

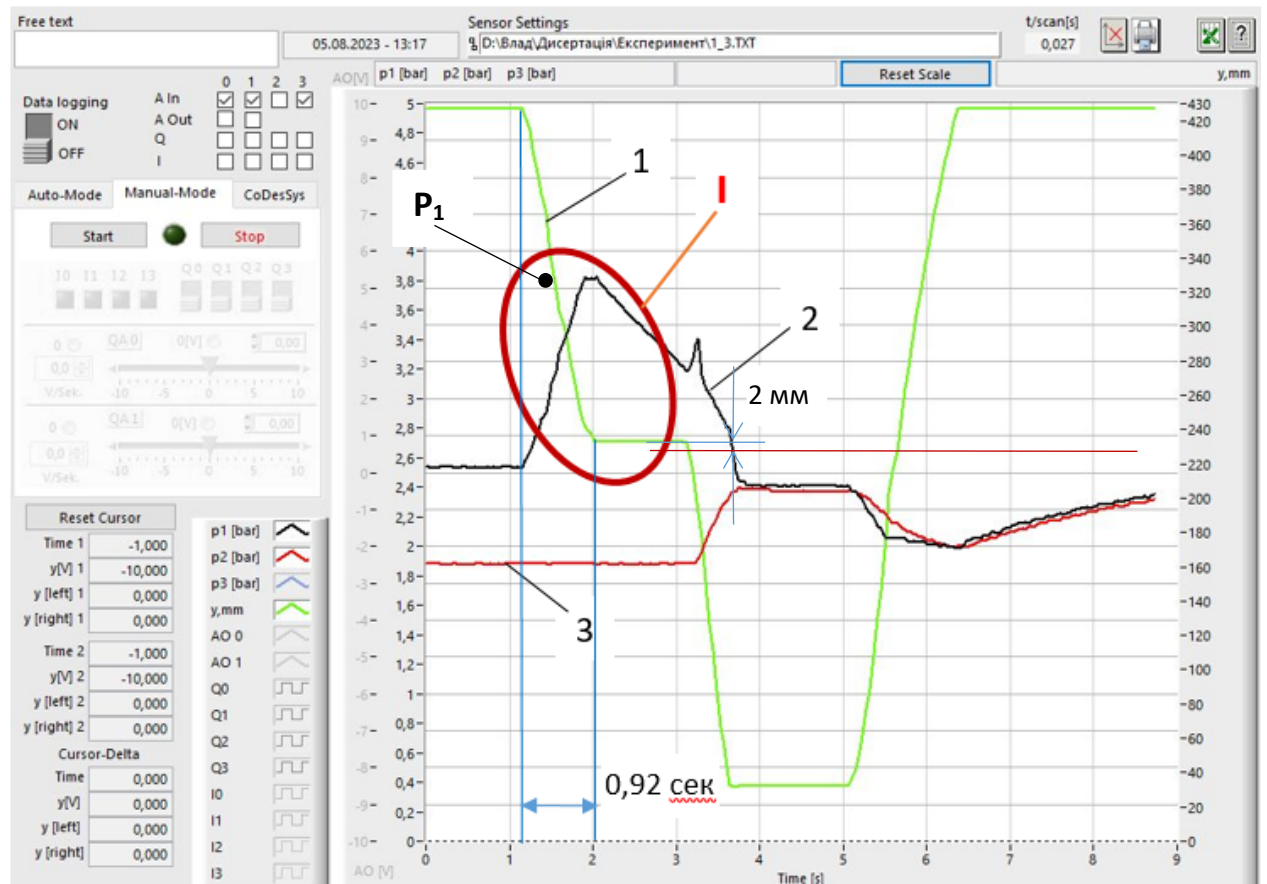


Рис. 5.2 Зміна координати платформи та тиску в порожнині пневмоциліндра під час виконання операції покрокового переміщення шарів вантажів (без підключення рекуператора енергії для першого шару) при початкових умовах: зведена маса платформи  $m_{пл} = 15$  кг; зведена маса шару тарних вантажів  $m_i = 20$  кг; початковий тиск повітря в нижній порожнині циліндра 2,5 бари (0,25МПа); початковому тиск повітря в ресивері рекуператора 1,9 бар(0,19МПа); 1 – координата переміщення платформи з шарами тарних вантажів; 2 – зміна тиску в нижній порожнині пневматичного циліндра; 3 – зміна тиску в ресивері рекуператора.

Встановлено, що експериментальні дослідження величини тиску в нижній порожнині пневмоциліндра співпадають з результатами теоретичного дослідження з похибкою до 2,8 %, що є допустимим для такого виду досліджень.

З графіків рис. 5.1 та рис 5.2 можна зробити висновок, що кінематичні параметри, які характеризують миттєву координату переміщення платформи з

першим шаром тарних вантажів мають коливальні процеси, які активно утворюються в другій половині шляху (зона І).

Таблиця 5.1

**Теоретичне та експериментальне значення тиску в нижній порожнині пневмоциліндра на кінець першого кроку опускання платформи**

Зведена маса шару тарних вантажів, кг	Математична модель, бар (МПа)	Експериментальні дослідження, бар (МПа)	Похибка %
10	2,5 (0,250)	2,5 (0,257)	2,8
20	3,8 (0,380)	3,8 (0,388)	2,1

Експериментально досліджено, що амплітуда та частота таких коливань залежить від зведеної маси шару тарних вантажів та початкового тиску повітря в нижній частині пневмоциліндра. Наявність коливальних процесів створює умови до переходу функціонально-мехатронного модуля покрокового переміщення платформи з детермінованої системи в стохастичну і як наслідок спостерігається неконтрольоване збільшення часу опускання платформи. Подальші дослідження, щодо усунення такого явища шляхом пошуку оптимального значення початкового тиску в пневмоциліндрі для заданих мас шарів, не привели до суттєвого покращення роботи мехатронного модуля.

Таким чином на основі експериментальних досліджень керування покроковим переміщенням платформи з шарами тарних вантажів можна стверджувати, що підключення ресивера для рекуперації енергії потрібно виконувати не після першого кроку, а на першому кроці опускання. Крім того точність позиціонування платформи на першому кроці забезпечувалася роботою пневматичних фіксаторів (рис. 4.9) в процесі її переміщення. Такий режим різкої зупинки платформи приводив до появи ударних явищ на сформовані структурні елементи транспортного пакету.

На другому етапі експериментальних досліджень визначено вплив зміни маси структурного елемента транспортного пакету на точність його позиціонування в

кінці першого кроку опускання без підключення ресивера акумулятора. Мета дослідження – встановити вплив зміни початкових параметрів тиску в нижній порожнині пневмоциліндра на похибку позиціювання платформи з шаром тарних вантажів. Дослідження проводилися для шарів тарних вантажів масою 10 кг, 20 кг та 25 кг по координатах переміщення 240 мм, 195 мм та 160 мм.

Так, для зведеної маси шару тарних вантажів в 10 кг за допомогою математичної моделі (4.22) та (4.27) було визначено початковий та кінцевий тиск в порожнині пневмоциліндра при опусканні платформи на величину 195 мм. Опускання першого шару тарних вантажів зведеною масою 10 кг забезпечило його позиціювання в указаних координатах, які в подальшому зрівнювалися з заданими 195 мм рис.5.1. Відповідно похибка позиціювання знаходиться в межах  $\pm 3$  мм.

За такою методикою проведено експериментальні дослідження формування транспортного пакету з шарів тарних вантажів зведеною масою 20 кг (рис. 5.2) та 25 кг.

Результати експериментальних досліджень визначення середнього значення похибки позиціювання платформи з одним шаром тарних вантажів за умови їх різної маси наведено в таблиці 5.2. Можна зробити висновок, що при великих значеннях зведеної маси шару тарних вантажів та малих значеннях керуючого тиску в нижній порожнині пневмоциліндра на початковому етапі руху платформи відбувається малоконтрольований процес опускання платформи з тарним вантажем (рис. 5.1 та рис. 5.2). Його тривалість обмежується умовою зростання зусилля опору повітря в нижній порожнині пневмоциліндра до значення еквівалентного величині зведеної маси платформи з шаром тарних вантажів.

Основним недоліком такого процесу є низька керованість переміщення платформи і як наслідок великі похибки її позиціювання: досліді № 2, 3 (табл, 5.2). Було встановлено, що похибка позиціювання зменшується при збільшенні координати опускання платформи: досліді № 9 (табл, 5.2).

На третьому етапі експериментального дослідження досліджено процес опускання платформи за рахунок контрольованого перетікання повітря з нижньої порожнини циліндра в ресивер акумулятора з урахуванням висновків попередніх

етапів дослідження.

Таблиця 5.2

**Результати експериментальних досліджень визначення середнього значення похибки позиціонування платформи з одним шаром тарних вантажів за умови їх різної маси та початкових значеннях тиску в системі керування**

№ досліджу	Маса шару тарних вантажів, кг	Координата та похибка позиціонування на першому кроці опускання платформи з шаром тарних вантажів, мм		
		240	195	160
початковий тиск повітря в нижній порожнині циліндра 2 бар (0,2МПа), (початкові дані були розраховані для маси шару тарних вантажів $m_i=10$ кг).				
1	<b>10</b>	<b>240 ±3</b>	<b>195 ±3</b>	<b>160 ±3</b>
2	20	240 -6	195 -4	160 ±3
3	25	240 -10	195 -7	160 -3
початковий тиск повітря в нижній порожнині циліндра 2.5 бар (0,25МПа), (початкові дані були розраховані для маси шару тарних вантажів $m_i=20$ кг).				
4	10	240 ±2	195 ±3	160 ±3
5	<b>20</b>	<b>240 ±2</b>	<b>195 ±2</b>	<b>160 ±3</b>
6	25	240 -5	195 -4	160 -2
початковий тиск повітря в нижній порожнині циліндра 3 бар (0,3МПа), (початкові дані були розраховані для маси шару тарних вантажів $m_i=25$ кг).				
7	10	240 ±2	195 ±2	160 ±1
8	20	240 ±2	195 ±2	160 ±1
9	<b>25</b>	<b>240 ±2</b>	<b>195 ±3</b>	<b>160 ±3</b>

Мета дослідження – визначити вплив зміни тиску в нижній порожнині пневмоциліндра на кінематичні параметри руху та похибку позиціонування платформи. Дослідження проводилися для шарів тарних вантажів масою 10 кг (рис.5.3) та 20 кг (рис.5.4), крок переміщення платформи становив 195 мм.

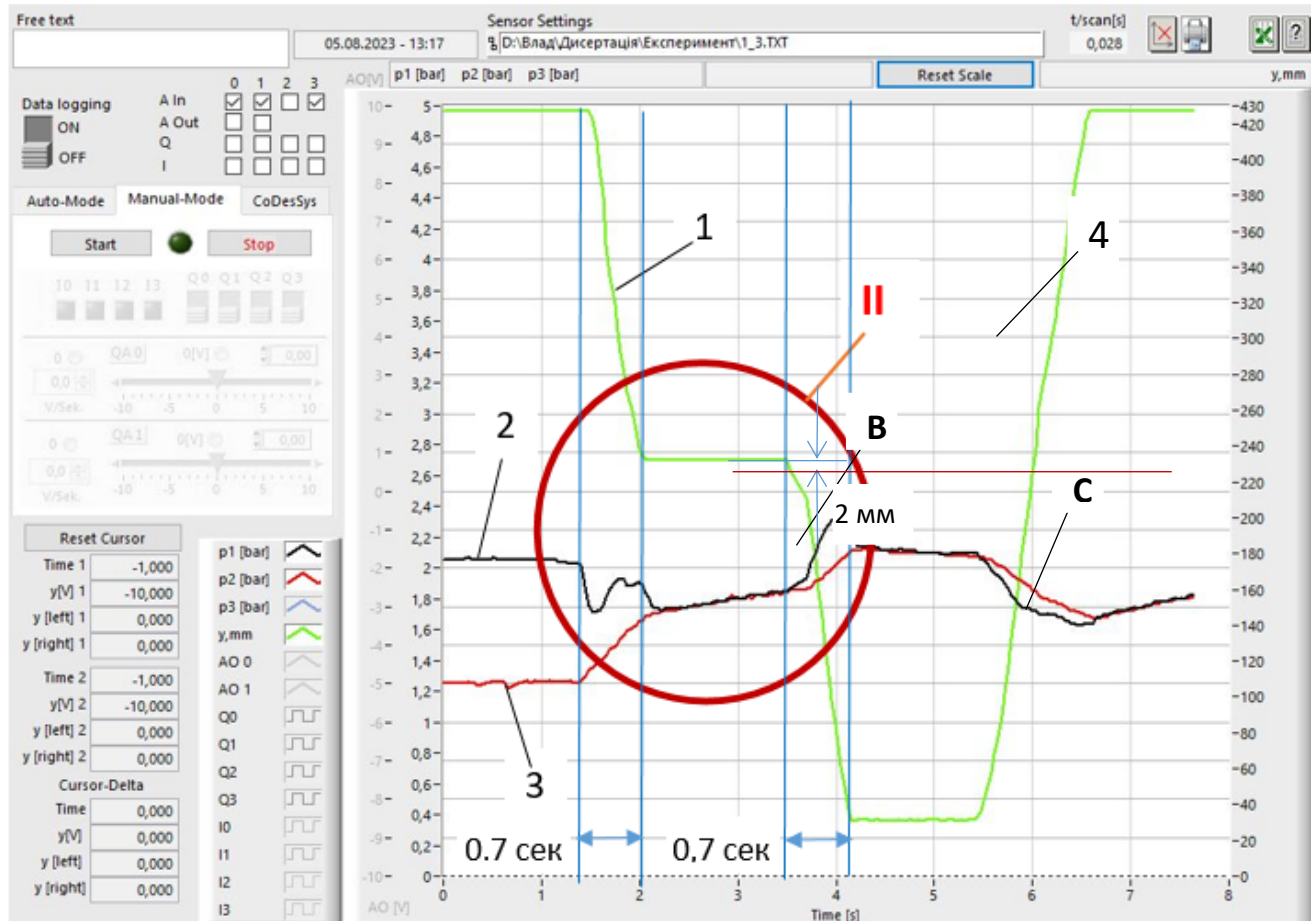


Рис. 5.3 Зміна координати платформи та тисків керуючих сигналів під час виконання операції покрокового переміщення шарів вантажів (з підключенням рекуператора енергії для переміщення першого та другого шарів) при початкових умовах: зведена маса платформи  $m_{ni} = 15$  кг; зведена маса шару тарних вантажів  $m_i = 10$  кг; хід до позиції зупинки по координаті 195 мм; початковому тиску повітря в нижній порожнині циліндра 2,5 бари (0,25МПа) ; початковому тиску повітря в ресивері рекуператора 2 бари (0,2МПа); 1 – координата переміщення платформи з шарами тарних вантажів; 2 – зміна тиску в нижній порожнині пневматичного циліндра; 3 – зміна тиску в ресивері рекуператора.

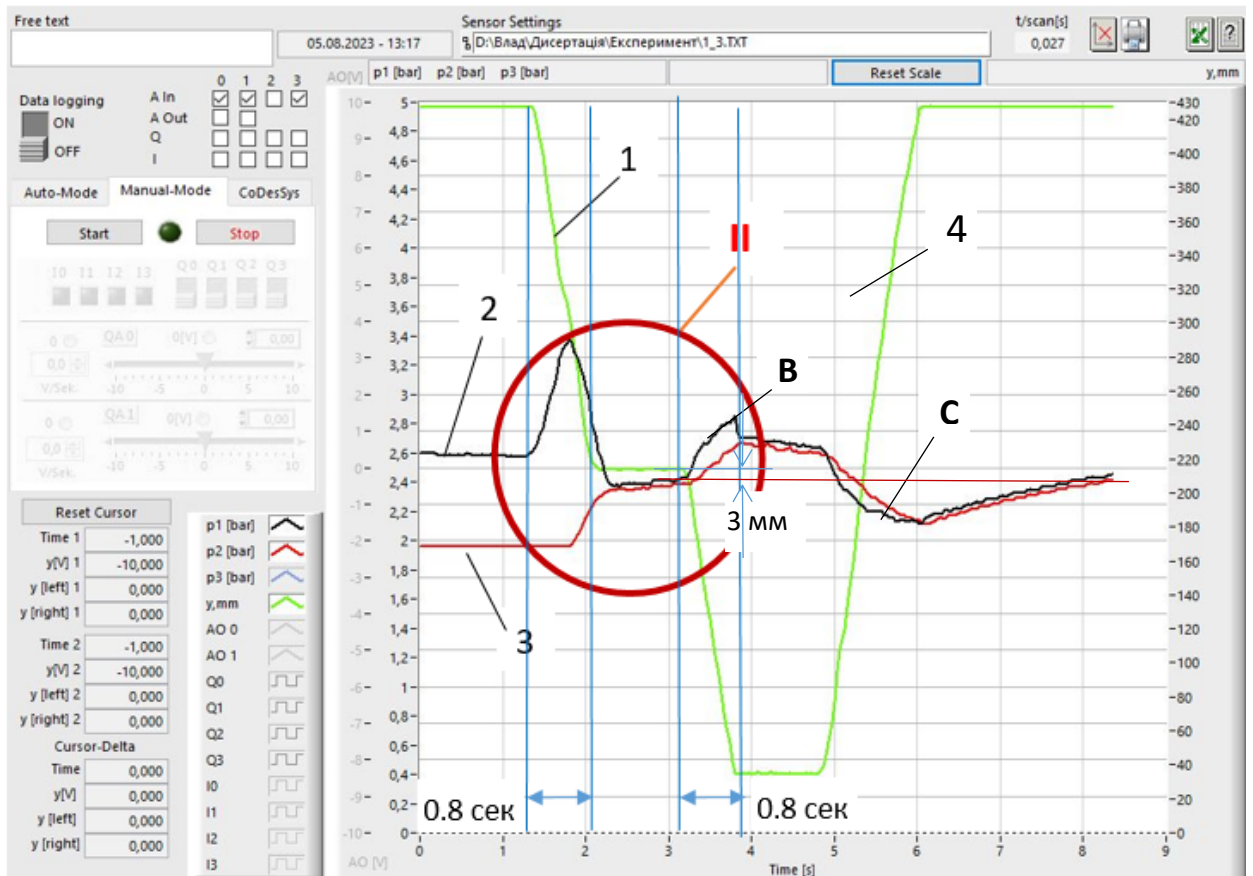


Рис. 5.4 Зміна координати платформи та тиску керуючих сигналів під час виконання операції покрокового переміщення шарів вантажів (з підключенням рекуператора енергії для переміщення першого та другого шарів) при початкових умовах: зведена маса платформи  $m_{nl} = 15$  кг; зведена маса шару тарних вантажів  $m_i = 20$  кг; хід до позиції зупинки по координаті 195 мм; початковому тиску повітря в нижній порожнині циліндра 2,5 бари (0,25МПа); початковому тиску повітря в ресивері рекуператора 2 бари (0,2МПа); 1 – координата переміщення платформи з шарами тарних вантажів; 2 – зміна тиску в нижній порожни пневматичного циліндра; 3 – зміна тиску в ресивері рекуператора

Порівняльні результати експериментального (точка Б на графіках рис. 5.3 та рис.5.4) та теоретичного (4.37) дослідження середнього значення тиску в пневматичній системі «пневмоциліндр-акумулятор» по закінченню формування транспортного пакету із двох шарів для зведених мас шару 10 кг та 20 кг наведено в таблиці 5.3.

**Теоретичне та експериментальне значення тиску в пневматичній системі  
по закінченню формування транспортного пакету**

Зведена маса шару тарних вантажів, кг	Математична модель, бар (МПа)	Експериментальні дослідження, бар (МПа)	Похибка %
10	2,45 (0,245)	2,23 (0,223)	8,9
20	3,10 (0,310)	2,8 (0,280)	9,6

Встановлено, що експериментальні дослідження величини тиску в пневматичній системі на момент закінчення формування транспортного пакету співпадають з результатами теоретичного дослідження з похибкою до 10%, що є допустимим для такого виду досліджень

З графіків рис. 5.5 та рис 5.6 видно, що кінематичні параметри, які характеризують миттєву координату переміщення платформи з першим та другим шарами тарних вантажів не мають коливальних процесів за рахунок контрольованого перетікання повітря з нижньої порожнини циліндра в ресивер акумулятора. Система керування функціонально-мехатронним модулем є детермінованою і має можливість миттєвого впливу на якість виконання технологічного процесу за рахунок послідовного підключення ресивера - акумулятора  $V_{bl}$  через керований дросель з одночасним контролем координат зупинки. Процес рекуперації енергії в акумулятор під час покрокового опускання платформи з першим та другим шарами показано зоною I (рис.5.3 та рис.5.4).

Слід зазначити, що експериментальними дослідженнями підтверджена можливість рекуперації енергії стисненого повітря в запропонованій конструкції функціонально-мехатронного модуля покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом під час формування структурних елементів транспортного пакету. Повторне використання енергії стисненого повітря з ресивера акумулятора, в якому вона накопичувалася під час опускання платформи з шарами тарних вантажів, направлено для піднімання порожньої платформи в початкове положення (крива 4, рис. 5.3 та рис. 5.4). Порівняльні результати

експериментального (точка С на графіках рис. 5.3 та рис.5.4) та теоретичного (4.42) досліджень середнього значення тиску в ресивері акумулятора після переміщення порожньої платформи в початкове положення наведено в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5

**Теоретичне та експериментальне значення величини тиску в акумуляторі після переміщення порожньої платформи в початкове положення**

<b>Зведена маса шару тарних вантажів, кг</b>	<b>Математична модель, бар(МПа)</b>	<b>Експериментальні дослідження, бар(МПа)</b>	<b>Похибка %</b>
10	1,68 (0,168)	1,73 (0,173)	4
20	2,23 (0,223)	2,18 (0,218)	2,3

Доведено, що експериментальні дослідження величини тиску в акумуляторі після переміщення порожньої платформи в початкове положення співпадають з результатами теоретичного дослідження з похибкою до 10 %, що є допустимим для такого виду досліджень.

За результатами досліджень похибки встановлено, що падіння тиску в пневматичній системі після переміщення порожньої платформи в початкове положення нижче на 10 % - 20 % за необхідне на момент виконання технологічної операції формування транспортного пакету. Таке явище можна пояснити частковим використанням стисненого повітря пневматичними фіксаторами та наявністю непродуктивних втрат стисненого повітря в пневматичній системі. Перед початком формування нового транспортного пакету тиск в пневматичній системі та ресивері акумулятора потрібно поновити до заданої величини.

Величину заощадження енергії у вигляді витрат стисненого повітря пораховано за методикою визначення витрат повітря під час роботи пневмоциліндра [58 - 80]. Для цього використано монограму витрат стисненого повітря, на якій знайдено точки перетину діаметра циліндра з тиском в його робочій порожнині на момент початку опускання платформи на кожному кроці (рис. 5.5). Розрахунок виконано для типової та запропонованої (рис.4.9) схем керування функціонально-мехатронним модулем покрокового переміщення платформи з пневматичним

приводом. Основні характеристики: діаметр циліндра 0,04 м, переміщення платформи 0,4 м, тиск повітря в типовій схемі керування 3 бари, розрахунковий тиск в запропонованій схемі керування 2,5 бари (4.22), маса шару тарних вантажів 20 кг. Продуктивність функціонально-мехатронного модуля складає 120 шарів за годину.

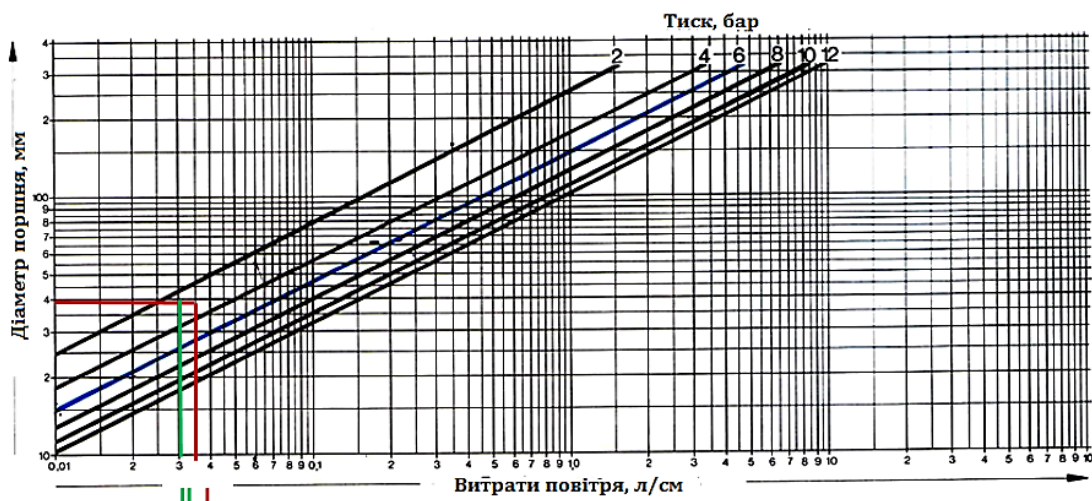


Рис. 5.5 Монограма визначення витрат стисненого повітря в пневмоциліндрах: I – витрати повітря при роботі типової схеми керування; II – витрати повітря при роботі запропонованої схеми керування

Результати споживання стисненого повітря на формування транспортного пакету типовою та запропонованою схемами з функцією рекуперації енергії показано в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6

**Споживання стисненого повітря на переміщення шарів вантажів під час формування транспортного пакету типовою схемою та запропонованою з функцією рекуперації енергії**

Схема керування пневмоциліндром	Витрати на технологічні операції		Загальні витрати	
	Опускання платформи, л	Піднімання платформи, г	Цикл, л	Годинна продуктивність л/год
Типова	1,4	1,4	2,8	336
Запропонована (рис.4.9)	1,28	0,4	1,68	202
<b>Заощадження</b>				134

На основі аналізу результатів експериментальних досліджень визначено, що запропонована схема керування функціонально-мехатронним модулем покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом заощаджує до 40 % енергії стисненого повітря в процесі формування транспортного пакету, яка може повторно використовуватися в наступному технологічному процесі формування транспортного пакету.

## **5.2 Дослідження функціонально-мехатронного модуля лінійного переміщення тарних вантажів з електромеханічним приводом.**

Методика проведення досліджень та опис експериментальної установки наведений в розділі 2 (підрозділ 2.5, рис. 2.17 – рис. 2.26). Функціонально-мехатронний модуль лінійного переміщення тарних вантажів з електромеханічним приводом може виконувати технологічні операції в робототехнічних комплексах формування транспортного пакету як в горизонтальній так і вертикальній площинах, тому дослідження технічних і технологічних характеристик його роботи проводилися при збільшенні кута нахилу переміщення каретки з тарним вантажем в просторі від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , тобто від горизонтального переміщення до вертикального опускання.

З аналізу існуючих конструкцій вітчизняних та закордонних зразків таких механізмів в робототехнічних комплексах формування транспортних пакетів встановлено, що середня швидкість переміщення каретки знаходиться в межах від 1 м/с до 2 м/с. Зведена маса тарного вантажу знаходилась в межах від 0,5 кг до 2 кг.

Для дослідження впливу зовнішніх факторів на час виконання технологічної операції переміщення тарного вантажу функціонально-мехатронним модулем з електромеханічним приводом проведений багатофакторний експеримент. Задача дослідження зводилася до розроблення математично - статистичної моделі, яка описує залежність зміни тривалості виконання технологічної операції переміщення тарного вантажу кареткою у вигляді функції:

$$t_n = f(\mathcal{Q}; m; \alpha) \quad (5.1)$$

де  $\mathcal{G}$  – максимальна швидкість переміщення каретки м/с;  $m$  – зведена маса тарних вантажів кг;  $\alpha$  – кут нахилу каретки в просторі, град.

Вибір вагомих факторів здійснювався методом експертного оцінювання. Кількість дослідів багатофакторного експерименту, за лінійної моделі становить  $N = 2^n = 2^3 = 8$ , де  $n$  – кількість вагомих та незалежних факторів [151].

Визначення кількості повторів проведення експерименту будувалося на прийнятому припущенні про нормальний закон розподілення похибок вимірювання за методикою [150]. Розрахункова кількість повторів в експерименті прийнято  $n=5$ . Рівні та інтервали варіювання змінних факторів наведено в таблиці 5.7.

Таблиця 5.7

**Рівні та інтервали варіювання змінних.**

Рівні варіювання	$X_1$ (v, м/с)	$X_2$ (m, кг)	$X_3$ ( $\alpha$ , °)
Верхній рівень (+1)	2	2	90
0-рівень	1,5	1,25	45
Нижній рівень (-1)	1	0,5	0
Крок варіювання $\Delta x$	0,5	0,75	45

Матриця плану активного експерименту та його результати по дослідженню тривалості переміщення тарного вантажу функціонально-мехатронним модулем лінійного переміщення з електромеханічним приводом наведена в таблиці 5.8.

Результати експериментальних досліджень в режимі реального часу записувалися у вигляді графіків на комп'ютер.

Результати дослідження впливу маси тарного вантажу на характер зміни технічних характеристик роботи електромеханічного приводу функціонально-мехатронного модуля за умови його переміщення в горизонтальній площині ( $\alpha = 0^\circ$ ) на відстань 300 мм при швидкості до  $v = 2$  м/с наведеній на рисунку 5.6; за незмінних початкових умов переміщення тарного вантажу у вертикальній площині ( $\alpha = 90^\circ$ ), на рисунку 5.7.

**План проведення та результати активного експерименту по дослідженню тривалості переміщення тарного вантажу функціонально-мехатронним модулем з електромеханічним приводом**

№	$z_0$	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_1z_2$	$z_1z_3$	$z_2z_3$	$z_1z_2z_3$	$\vec{Y}$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	484
2	+	+	+	-	+	-	-	-	486
3	+	+	-	+	-	+	-	-	487
4	+	+	-	-	-	-	+	+	494
5	+	-	+	+	-	-	+	-	484
6	+	-	+	-	-	+	-	+	488
7	+	-	-	+	+	-	-	+	487
8	+	-	-	-	+	+	+	-	496

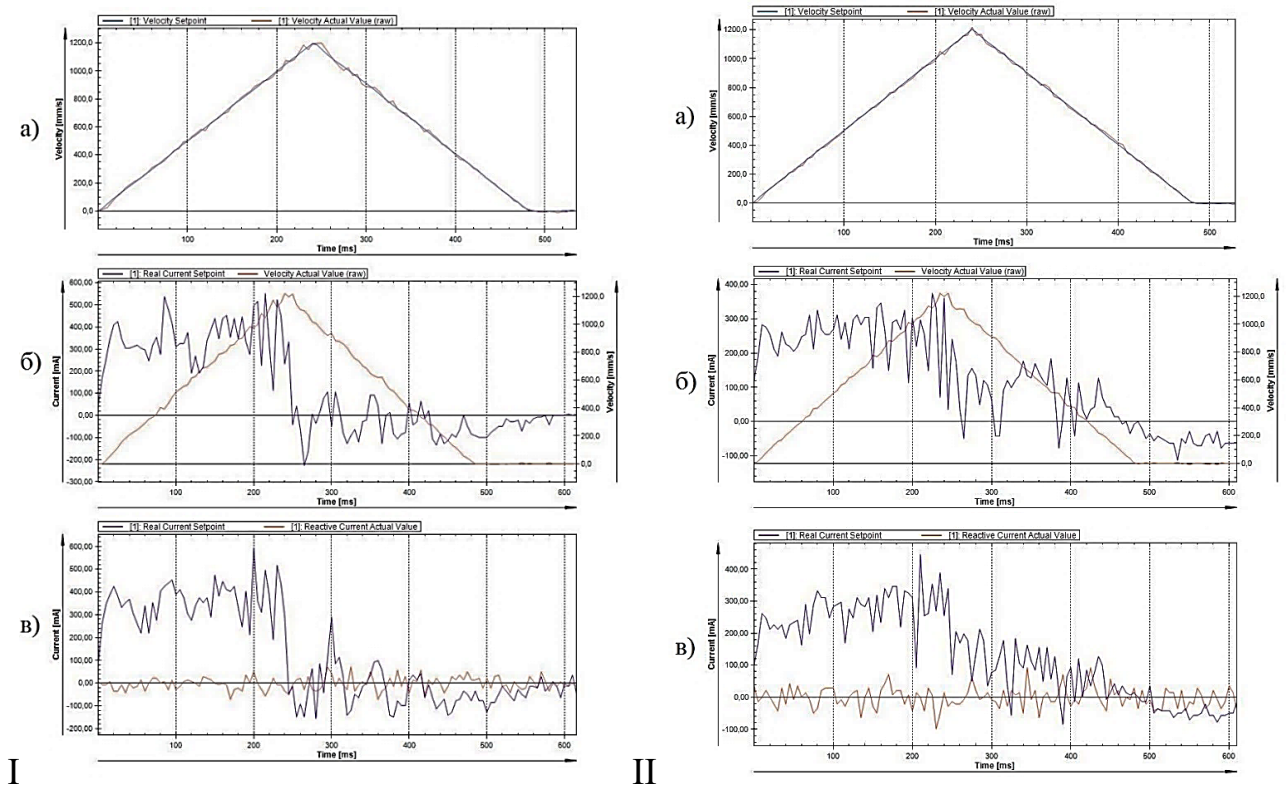


Рис. 5.6 Результати експериментального дослідження впливу маси тарного вантажу на характер зміни технічних характеристик роботи електромеханічного

приводу функціонально-мехатронного модуля лінійного переміщення в горизонтальній площині для мас: I – 2 кг; II – 0,5 кг; а – теоретична (velocity setpoint) та експериментальна (velocity actual value (raw)) швидкості; б, в – характеристика зміни струму двигуна (real current setpoint) .

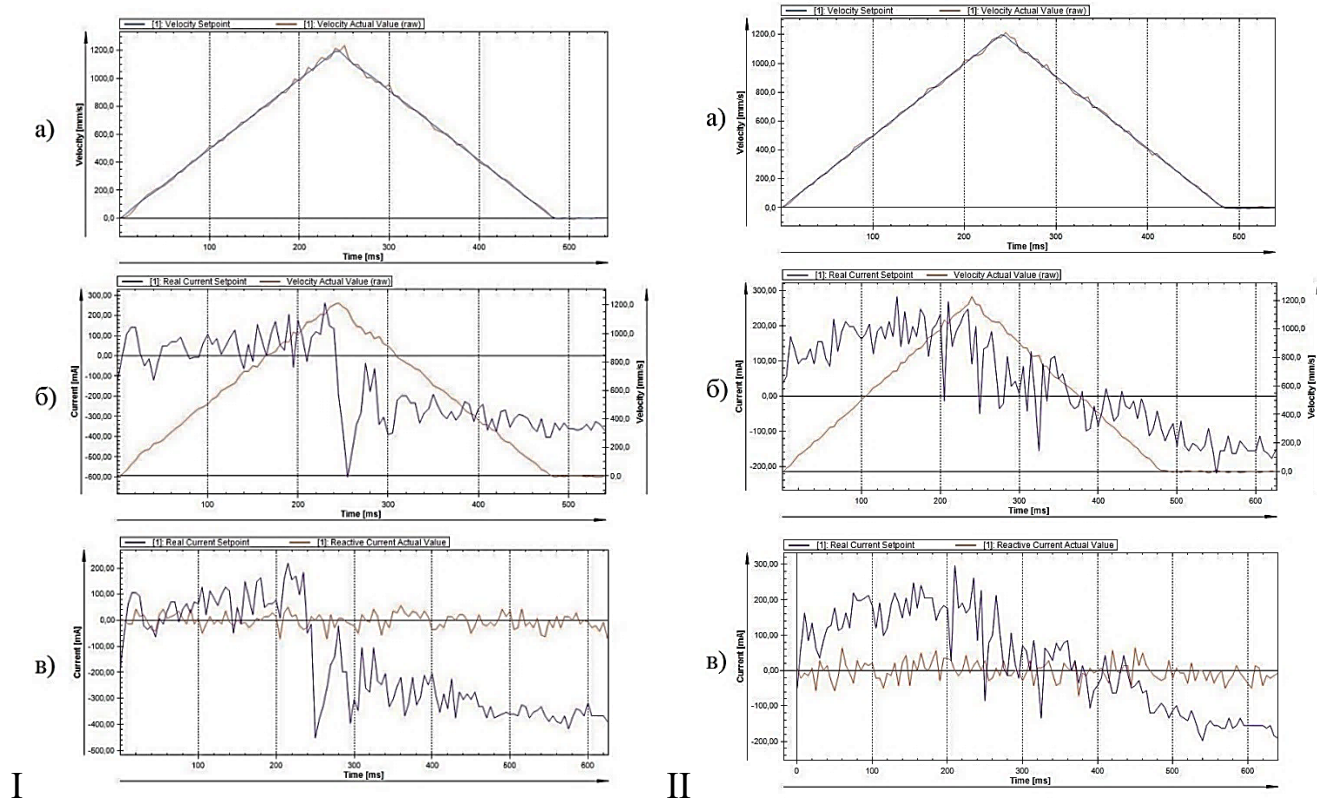


Рис. 5.7 Результати експериментального дослідження впливу маси тарного вантажу на характер зміни технічних характеристик роботи електромеханічного приводу функціонально-мехатронного модуля лінійного переміщення у вертикальній площині при швидкості  $v = 2$  м/с для мас: I – 2 кг; II – 0,5 кг; а – теоретична (velocity setpoint) та експериментальна (velocity actual value (raw)) швидкості; б, в – характеристика зміни струму двигуна (real current setpoint) .

Порядок оброблення багатofакторного експерименту наведено в додатку Д. Рівняння регресії для визначення тривалості переміщення тарного вантажу функціонально-мехатронним модулем з електромеханічним приводом має вигляд:

$$t = \frac{512,87 - 16,429 - 12,5m - 0,31\alpha + 8,39m - 0,219\alpha}{1000} \quad (5.2)$$

На основі аналізу отриманих результатів тривалості переміщення тарних вантажів в горизонтальній та вертикальній площинах (5.2) та (5.3) можна стверджувати, що основним фактором, який обмежує швидкодію мехатронного модуля лінійного переміщення з електричним приводом є маса тарного вантажу. Великі інерційні складові руху забезпечують вихід системи керування функціонально-мехатронним модулем лінійного переміщення зі сталого режиму роботи. За результатами досліджень можливих варіантів протидії таким коливанням та вплив їх на роботу функціонально- мехатронного модуля з лінійним електродвигуном на рівні удосконалення схеми його керування можна зробити висновок, що така задача є проблематичною і малоефективною. Нагальним рішенням даної проблеми може бути застосування нових конструкцій захоплювальних пристроїв, які можуть локалізувати такі коливання .

**5.3. Дослідження функціонально-мехатронного модуля із вакуумним захоплюючим пристрем для утримання тарного вантажу.**

**5.3.1. Визначення зусилля утримання тарних вантажів пакованих в різні марки картону**

Для проведення експериментальних досліджень були використані зразки картону марок: МО, НМ, Н, ММ з товщиною 0,40 мм та 0,50 мм. Таке обґрунтування вибору картону базувалося на висновках про будову гофрокартону, який складається з двох різних видів картону, гладкого та хвилястого та функціонального призначення кожного шару [1]. Так шар лайнеру в гофрокартоні (зовнішній, гладкий лист картону) є основним утримуючим елементом при контакті з присмоктувачем. Шар флутінгу (шар гофри) знаходиться в середині гофрокартону та відповідає за амортизацію виробу, тобто протистоїть статичним та динамічним навантаженням і не впливає на характеристики сили утримання.

Для експерименту використовувались присмоктувачі з діаметрами: 30, 40 та 60 мм. Робота вакуумних генераторів забезпечувалась тиском в магістралі 5 бар (0,5МПа), який рекомендований паспортними характеристиками виробників для такого виду обладнання. Контроль тиску магістралі та величина вакууму здійснювався за допомогою електронних датчиків тиску з похибкою вимірювання

$\pm 0.01$  бар. Опис експериментальної установки та методика проведення досліджень наведені в розділі 2 (підрозділ 2.4, рис.2.11 – рис.2.15). Розрахункова кількість повторів в експерименті прийнято  $n=5$  (Додаток В). Результати експериментальних досліджень величини вакууму в присмоктувачах та зусилля утримання залежно від тиску повітря в магістралі, діаметрів присмоктувачів для різних видів пакувальних матеріалів наведено в табл. 5.7. – 5.10 (Додаток Г).

Порівняльна характеристика величин зусилля утримання тарних вантажів пакованих в різні марки гофрокартону від діаметрів присмоктувачів, отриманих за допомогою математичної моделі (4.99) та експериментальних досліджень наведено на графіках (рис. 5.8- рис.5.11).

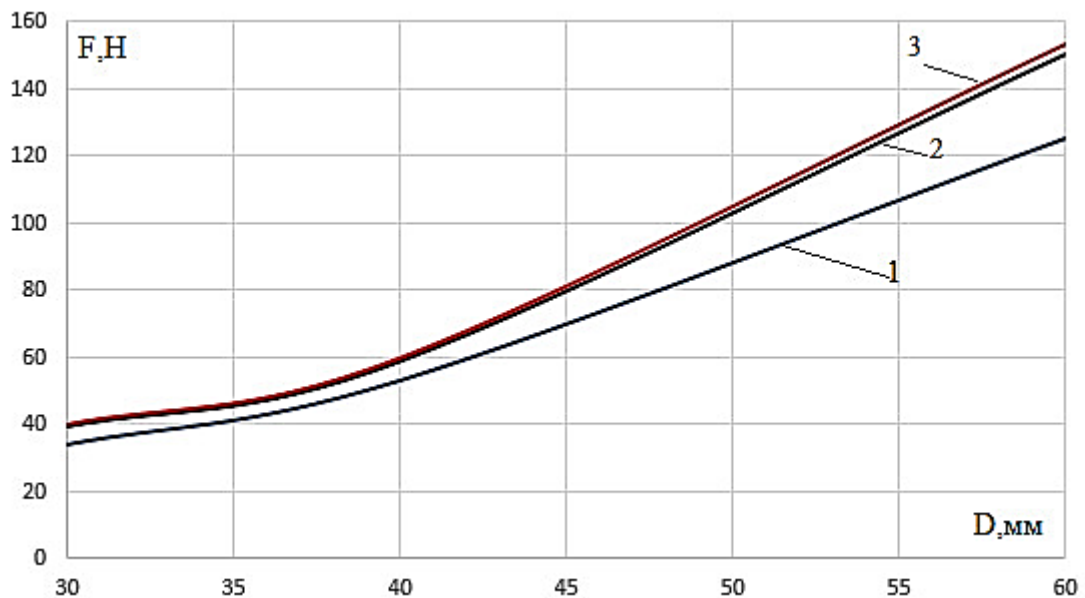


Рис.5.8 Характеристика зміни зусилля утримання тарного вантажу пакованого в гофрокартон марки МО від діаметрів вакуумних присмоктувачів при тиску повітря в магістралі 5 бар (0,5МПа) у вигляді рівнянь апроксимації та коефіцієнтів достовірності: 1 – теоретичне зусилля:  $y = 0,0567x^2 - 2,0667x + 45$  та  $R^2 = 1$ ; 2- експериментальне зусилля для товщини картону 0,4 мм:  $y = 0,0765x^2 - 2,9817x + 56,72$  та  $R^2 = 1$ ; 3 - експериментальне зусилля для товщини картону 0,5 мм:  $y = 0,0765x^2 - 2,9817x + 56,72$  та  $R^2 = 1$

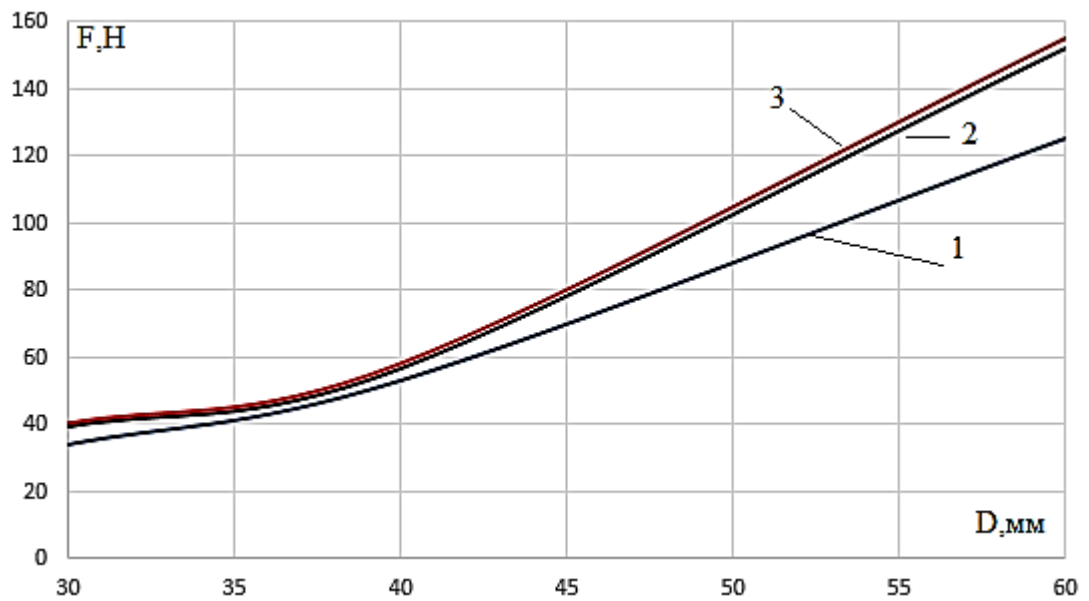


Рис.5.9 Характеристика зміни зусилля утримання тарного вантажу пакованого в гофрокартон марки НМ від діаметру вакуумного присмоктувача при тиску повітрямагістралі 5 бар у вигляді рівнянь апроксимації та коефіцієнтів достовірності: 1 – теоретичне зусилля:  $y = 0,0567x^2 - 2,0667x + 45$  та  $R^2 = 1$ ; 2- експериментальне зусилля для товщини картону 0,4 мм:  $y = 0,0892x^2 - 4,068x + 77,96$  та  $R^2 = 1$ ; 3 - експериментальне зусилля для товщини картону 0,5 мм:  $y = 0,0892x^2 - 4,068x + 77,96$  та  $R^2 = 1$

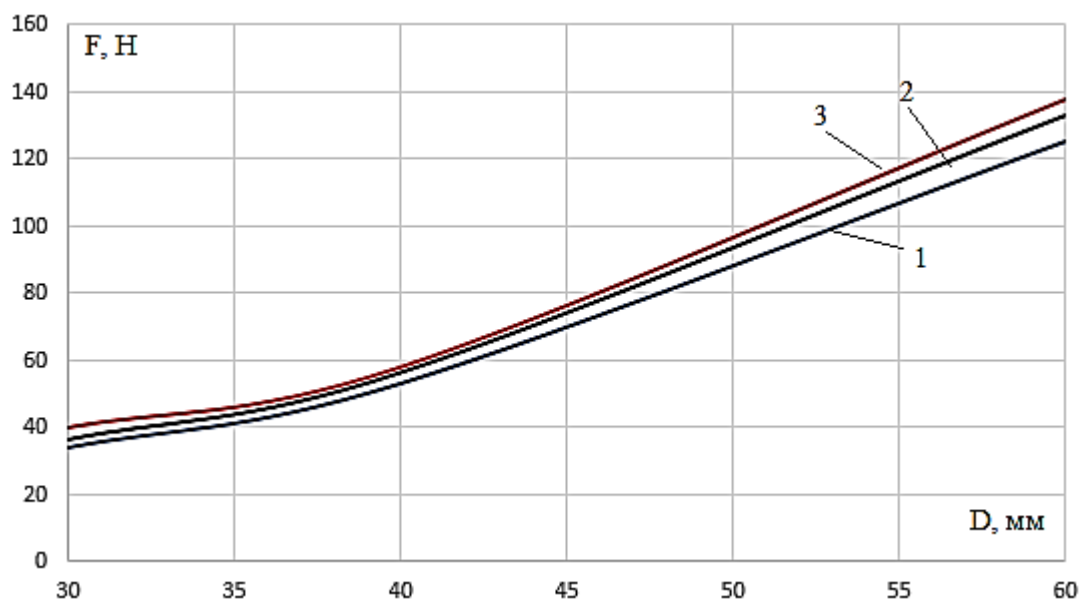


Рис.5.10 Характеристика зміни зусилля утримання тарного вантажу пакованого в картон марки Н від діаметра вакуумного присмоктувача при тиску повітря магістралі 5 бар у вигляді рівнянь апроксимації та коефіцієнтів достовірності: 1 –

теоретичне зусилля:  $y = 0,0567x^2 - 2,0667x + 45$  та  $R^2 = 1$  ; 2- експериментальне зусилля для товщини картону 0,4 мм:  $y = 0,0602x^2 - 2,0578x + 43,82$  та  $R^2 = 1$  ; 3 - експериментальне зусилля для товщини картону 0,5 мм:  $y = 0,0602x^2 - 2,0578x + 43,82$  та  $R^2 = 1$

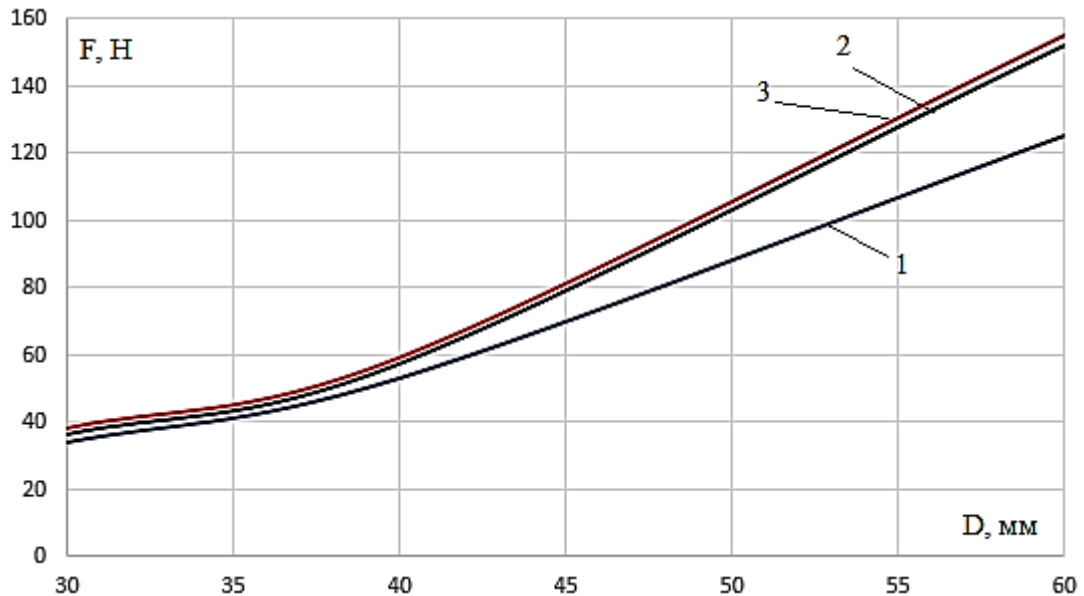


Рис.5.11 Характеристика зміни зусилля утримання тарного вантажу пакованого в гофрокартон марки ММ від вакуумного присмоктувача при тиску повітря магістралі 5 у вигляді рівнянь апроксимації та коефіцієнтів достовірності: 1 – теоретичне зусилля:  $y = 0,0567x^2 - 2,0667x + 45$  та  $R^2 = 1$ ; 2- експериментальне зусилля для товщини картону 0,4 мм:  $y = 0,0866x^2 - 3,8997x + 77,38$  та  $R^2 = 1$  ; 3 – експериментальне зусилля для товщини картону 0,5 мм:  $y = 0,0866x^2 - 3,8997x + 77,38$  та  $R^2 = 1$

Експериментально встановлено, що зі збільшенням діаметра вакуумного присмоктувача зусилля утримання між теоретичними та експериментальними значеннями зростає на користь останніх. Так для присмоктувача діаметром 30 мм середнє значення похибки зусилля утримання становить до 7,4 %, для присмоктувача діаметром 40 мм становить до 8,9 %, а для присмоктувача діаметром 60 мм до 13 %.

Результати експериментальних досліджень величин вакууму для різних діаметрів присмоктувачів при використанні однакої марки пакувального матеріалу наведено на рис. 5.12.

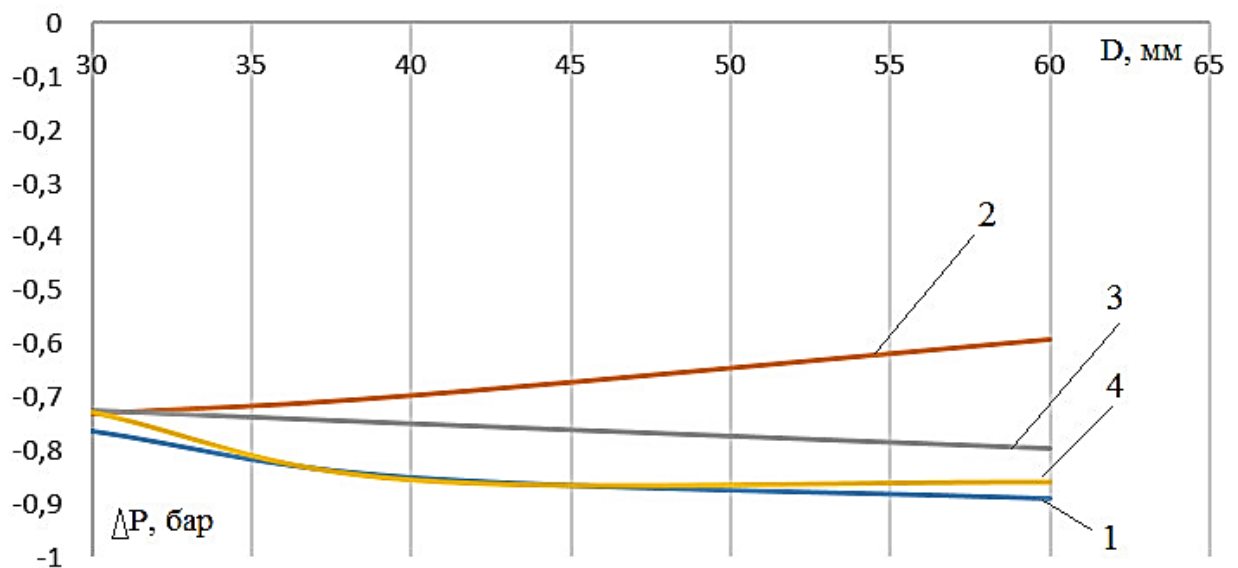


Рис. 5.12 Характеристика зміни вакууму в вакуумному присмоктувачі на момент утримання тарного вантажу пакованого в різні пакувальні матеріали від діаметру присмоктувача у вигляді рівнянь апроксимації та коефіцієнтів достовірності:

1 – Картон хром – ерзац макулатурний марки МО першого сорту по ТУ У 05509659-008-2000:  $y = 0,0002x^2 - 0,0247x - 0,228$  та  $R^2 = 1$ ;

2 - Картон макулатурний марки НМ ТУ У 21.1 - 05509659-008-2001:  $y = 6E-05x^2 - 0,0008x - 0,762$  та  $R^2 = 1$ ;

3 – Картон хром – ерзац макулатурний марки Н першого сорту по ТУ У 05509659-008-2000:  $y = 5E-06x^2 - 0,0029x - 0,645$  та  $R^2 = 1$ ;

4 - Картон макулатурний марки ММ ТУ У 21.1-05509659-020-2001:  $y = 0,0004x^2 - 0,0419x + 0,152$  та  $R^2 = 1$ .

Отримані закономірності зміни величини вакууму від діаметру присмоктувача для кожного виду пакувального матеріалу тарних вантажів на момент їх утримання (рис.5.12) показують необхідність подальших досліджень, щодо уточнення значення коефіцієнту безпеки в математичних моделях, як диференційованої

величини яка залежить від діаметра присмоктувача та марки пакувального матеріалу.

### **5.3.2. Дослідження зусилля зчеплення тарного вантажу з вакуумним присмоктувачем**

Проведення експериментальних досліджень базувалось на методиці, описаній в підрозділі 2.4.2 та на елементній базі, зразках картону марок: МО, НМ, Н, ММ та величинах вакууму, які були прийняті в дослідженні розділу 5.1.1. Для експерименту використовувались присмоктувачі з діаметрами: 30, 40 та 60 мм. Робота вакуумних генераторів відбувалась при тиску повітря магістралі 5 бар (0,5МПа). Опис експериментальної установки та методика проведення досліджень наведені в розділі 2 (підрозділ 2.42, рис.2.16). Результати експериментальних досліджень вакууму та зусилля зчеплення тарного вантажу пакованого в гофрокартон різних марок з вакуумним присмоктувачем залежно від тиску повітря в магістралі та діаметрів присмоктувачів наведено в табл. 5.5.

За результатами дослідження можна зробити висновок, що експериментальні значення зусилля зчеплення тарного вантажу пакованого в гофрокартон різних марок з вакуумним присмоктувачем доводить адекватність запропонованої математичної моделі реальним процесам. Похибка отриманих результатів знаходиться в межах до 7 %, що є допустимим для таких досліджень.

Результати закономірностей зміни зусилля зчеплення тарного вантажу від діаметрів присмоктувачів для кожного виду пакувального матеріалу тарних вантажів наведено у вигляді рівнянь апроксимації:

✓ для марки картону МО:  $y = 0,008d^2 - 0,61d + 10,5$  і  $R^2=1$ ;

✓ для марки картону ММ:  $y = 0,008d^2 - 0,53d + 11,8$  і  $R^2=1$ ;

✓ для марки картону Н:  $y = 0,008d^2 - 0,529d + 11,1$  і  $R^2=1$ ;

✓ для марки картону НМ:  $y = 0,008d^2 - 0,424d + 9,9$  і  $R^2=1$ .

Отримані закономірності зміни зусилля зчеплення були використані в силових розрахунках значення вакууму (розділ. 4.5.1) для функціонально-мехатронного модуля із вакуумним захоплюючим елементом.

## Висновки до розділу V

- Експериментально підтверджено адекватність математичних моделей визначення величини тиску в нижній порожнині пневмоциліндра на кінець першого кроку опускання платформи та точності її позиціонування без підключення ресивера-акумулятора (похибка результатів становить до 10 %). Експериментально досліджено, що на першому кроці переміщення платформи відбуваються коливальні процеси, які з'являються після переміщення платформи на половину шляху опускання (зона I, рис.5.1 та рис.5.2). Встановлено, що амплітуда та частота таких коливань залежить від зведеної маси шару тарних вантажів та початкового тиску повітря в нижній частині пневмоциліндра. Наслідком таких процесів є неконтрольована тривалість опускання платформи з шаром тарних вантажів та великі похибки її позиціонування. Зведені результати експериментальних досліджень представлені у вигляді графіків рис. 5.3 та рис. 5.4. Для усунення таких коливань запропоновано в кінці першого кроку опускання платформи почати підключати до пневматичної системи ресивер акумулятора. Експериментально доведено, що при такому режимі роботи система керування функціонально-мехатронним модулем є детермінованою щодо впливу на тривалість виконання технологічного процесу та контролю координати зупинки.

- Експериментально підтверджено роботу запропонованої системи керування функціонально-мехатронного модуля покрокового переміщення платформи щодо повторного використання енергії стисненого повітря для піднімання порожньої платформи в початкове положення (рис. 5.5 та рис. 5.6). Доведено, що експериментальні дослідження величини тиску в акумуляторі після переміщення порожньої платформи в початкове положення співпадають з результатами теоретичного дослідження з похибкою до 10 %. Встановлено, що падіння тиску в пневматичній системі після переміщення порожньої платформи в початкове положення нижче на 10 % - 20 % за необхідне на момент виконання технологічної операції формування транспортного пакету (таблиця 5.3). Такий процес можна пояснити частковим використанням стисненого повітря пневматичними фіксаторами та наявністю непродуктивних втрат стисненого повітря в

пневматичній системі. Рекомендовано, перед початком формування нового транспортного пакету, тиск в пневматичній системі пневмоциліндра та ресивері поновляти до заданих величин.

- Встановлена закономірність зміни похибки позиціонування платформи від маси структурного елемента транспортного пакету для різних режимів роботи мехатронного модуля. Визначено, що середня похибка позиціонування платформи на першому кроці опускання становить до 10 %. При укладанні другого, третього і наступних шарів тарних вантажів похибка суттєво зменшується та невелиюється за рахунок збільшення опору переміщення платформи від тиску повітря в нижній порожнині пневмоциліндра (рис. 5.8). Для зменшення похибки позиціонування платформи на першому кроці при зміні маси тарного вантажу запропоновано переналагоджувати систему на нові значення початкового тиску в порожнині пневмоциліндра 2 та ресивері акумулятора 7 (рис. 4.9), значення яких визначаються за допомогою математичних моделей (4.42) та (4.48).

- На основі результатів експериментальних досліджень визначено, що запропонована схема керування функціонально-мехатронним модулем покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом заощаджує до 40 % енергії стисненого повітря в процесі формування транспортного пакету, яка повторно використовується в наступному технологічному процесі формування транспортного пакету.

- На основі експериментальних досліджень описано функцію зміни часу переміщення тарних вантажів у вертикальній та горизонтальній площинах мехатронним модулем лінійного переміщення з електромеханічним приводом залежно від максимальної швидкості переміщення каретки, маси тарного вантажу та кута нахилу каретки в просторі (5.2).

• Встановлено та аналітично описано характер зміни зусиль утримання та зчеплення тарних вантажів залежно від діаметрів присмоктувачів для різних марок картону (рис.5.8 – рис.5.11). Порівняльний аналіз теоретичних та експериментальних значень зусиль утримання тарних вантажів показав, що в присмоктувачі діаметром 30 мм середнє значення експериментального зусилля

відриву більше за теоретичне до 7,4 %, в присмоктувачі діаметром 40 мм до 8,9 %, а для присмоктувача діаметром 60 мм до 13 %. Отримані закономірності зміни величини вакууму від діаметру присмоктувача для кожного виду пакувального матеріалу тарних вантажів на момент їх утримання (рис.5.12) показують необхідність подальших досліджень, щодо уточнення значення коефіцієнту безпеки в аналітичних моделях, як диференційованої величини яка залежить від діаметра присмоктувача та марки пакувального матеріалу.

- Визначено закономірності зміни зусилля зчеплення тарного вантажу від величини вакууму в присмоктувачах різних діаметрів для кожного виду пакувального матеріалу тарних вантажів, які були використані в силових розрахунках рушійної сили вакуумного пристрою захоплення (підрозділ. 4.5.1).

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі проведених комплексних досліджень розроблено методологічний підхід до проєктування робототехнічних комплексів формування збільшених вантажних одиниць із харчовими продуктами, що дав можливість розробити можливі варіанти їх компонувань та провести з високою достовірністю оцінку їх параметрів для визначення кращого варіанту щодо виконання максимальної кількості корисних функцій та відповідності регламентованим значенням критеріїв технічної ефективності. Результатом застосування такого методологічного підходу проєктування є розроблена конструкція спеціалізованого робототехнічного комплексу із функціонально-мехатронних модулів, яка за результатами експериментальних досліджень має можливість заощаджувати до 50% енергії стисненого повітря.

2. На основі проведеного морфологічного синтезу встановлено такі вагомні параметри та критерії технічної ефективності як для робототехнічного комплексу, так і для його функціональних модулів: максимальне навантаження, максимальна швидкість руху ланок, точність позиціонування робочих ланок, енерговитрати на виконання основної функції, можливість переналагодження. За цими критеріями обґрунтовано вибір раціональних структур функціонально-мехатронних модулів.

3. З урахуванням коефіцієнтів значущості, що базуються на заданих пріоритетах між вибраними критеріями, отримана пошукова множина функціонально-мехатронних модулів із різним видом привода для вертикального переміщення тарного вантажу в межах аналізу чотирьох типів функціональних модулів, а для горизонтального переміщення тарного вантажу в межах аналізу п'яти типів функціональних модулів.

4. Встановлено та експериментально підтверджено функціональну залежність коефіцієнта рекуперації енергії стисненого повітря, в запропонованій конструкції функціонально-мехатронного модуля покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом, та координати зупинки платформи. На основі результатів експериментальних досліджень визначено, що запропонована схема керування функціонально-мехатронним модулем покрокового переміщення платформи з

пневматичним приводом заощаджує до 40% енергії стисненого повітря в процесі формування транспортного пакету, яка може повторно використовуватися в наступному циклі технологічного процесу формування транспортного пакету.

5. Встановлено функціональну залежність між масою структурних елементів транспортного пакету, рушійним зусиллям платформи мехатронного модуля покрокового переміщення платформи з пневматичним приводом та значенням керуючого сигналу, що дає можливість забезпечити задану точність позиціонування платформи. Визначено, що середня похибка позиціонування платформи становить до 2 %. Рекомендовано для зменшення похибки позиціонування платформи при зміні маси тарного вантажу перенастроювати систему на нові значення початкового тиску в порожнині пневмоциліндра та в ресивері акумулятора, величина яких визначається за допомогою розроблених аналітичних залежностей.

6. Розроблено комплексний підхід до визначення зусилля утримання тарних вантажів вакуумним присмоктувачем із врахуванням експлуатаційних вимог до вакуумних генераторів з функцією енергозбереження. Порівняльний аналіз аналітичних та експериментальних значень зусиль утримання тарних вантажів показав, що в присмоктувачі діаметром 30 мм середнє значення експериментального зусилля відриву більше за теоретичне на 7,4 %, в присмоктувачі діаметром 40 мм на 8,9 %, а для присмоктувача діаметром 60 мм на 13 %. Отримані закономірності зміни величини вакууму від діаметру присмоктувача для тарних вантажів із різного типу пакувального матеріалу на момент їх утримання показують необхідність подальших досліджень, щодо уточнення значення коефіцієнту безпеки в аналітичних моделях, як диференційованої величини що залежить від діаметра присмоктувача та марки пакувального матеріалу.

7. На основі розроблених аналітичних залежностей для визначення тривалості виконання технологічної операції переміщення тарного вантажу за заданим законом руху виконано оцінку раціональних параметрів функціонально-мехатронного модуля лінійного переміщення з електромеханічним приводом, що дало змогу зменшити сумарну потужність мехатронної системи.

8. Результати комплексних наукових досліджень стали науковою основою для розробки пілотних зразків нових функціонально-мехатронних модулів із пневматичним приводом та функцією рекуперації енергії для вертикального переміщення структурних елементів транспортного пакету та функціонально-мехатронного модуля вакуумного присторою захоплення з функцією енергозбереження.

9. Результати досліджень впроваджено під час проектування нового пакувального обладнання та модернізації існуючого на таких підприємствах: ДП «Фесто», ТОВ «НВО Інта», ОВ «Завод пакувального обладнання «Термо-Пак», з розрахунковим економічним ефектом 1 311 141 грн. та використовуються в навчальному процесі кафедрами машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв, мехатроніки та пакувальної техніки НУХТ під час викладання дисциплін: «Пакувальне обладнання», «Розрахунок мехатронних модулів технологічних машин», «Машини і технології пакування» (Додаток Д).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пакувальне обладнання : підручник / О. М. Гавва та ін. Київ : ІАЦ Упаковка, 2010. 746 с.
2. Гавва О. М., Беспалько А. П., Волчко А. І. Обладнання для групового пакування: підручник. Київ : ІАЦ Упаковка, 2017. 136 с.
3. Павленко І. І., Мажара В. А. Роботизовані технологічні комплекси : монографія. Кропивницький : ТОВ «КОД», 2019. 382 с.
4. Проектування пакувального обладнання із мехатронних модулів: монографія / М. В. Якимчук та ін.. Київ: Сталь, 2017. 515 с.
5. Деренівська А. В., Кривопляс-Володіна Л. О., Токарчук С. В. Визначення раціональних параметрів забезпечення стійкості транспортних пакетів методами підвищення сил тертя між шарами тарних вантажів. *Харчова промисловість*. 2020. № 27. С. 105–113.
6. Гавва О. М., Беспалько А. П. Скріплення транспортних пакетів стрічками (матеріали, технології та обладнання). *Упаковка*. 2014. № 5. С. 45–50.
7. Беспалько А. П., Гавва О. М., Токарчук С. В. Термоусаджувальна та розтягувальна плівки у пакуванні. Що вибрати? *Упаковка*. 2015. № 3. С. 12–15.
8. Мороз М. М., Загорянський В. Г. Проектування транспортно-технологічних систем вантажних перевезень : навч. посіб. Кременчук : КНУ ім. М. Остроградського, 2021. 205 с.
9. Гавва О. М., Кулик Н. В. Пакувальні машини. *Упаковка*. 2019. № 1. С. 50–55.
10. Iakymchuk M., Gavva O. Scientific substantiation of combined gripping devices 24 parameters in equipment for group packaging. *Journal of food and packaging science, technique and technologies*. 2014. № 3. С. 24–27.
11. Якимчук В. М., Гавва О. М. Дослідження похибки позиціонування робочих органів функціональних модулів із пневматичним сервоприводом у пакетоформувальних машинах. *Новітні технології пакування : матеріали доповідей XX науково-практичної конференції молодих вчених*. Київ, 2021. С.25–29.

12. Iakymchuk V., Gavva O. Structural and parametric synthesis of functional mechatronic modules of machines for formation of transportation packages of food products. *Proceedings of university of Ruse*. Vol. 58, book 10.2. 2019. P. 98–101.
13. Гавва О. М., Кривопляс-Володіна Л. О., Якимчук В. М. Функціонально-орієнтоване проектування пакувальних машин із врахуванням їх життєвого циклу. *Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності* : матеріали ІХ міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції, 10 грудня 2020 р. Київ: НУХТ, 2020. С. 123–124.
14. Якимчук М. В., Гавва О. М., Якимчук В. М. Особливості функціонально орієнтованого проектування машин пакування харчових продуктів у контексті технологій замкненого циклу. *Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті євроінтеграції* : програма та тези матеріалів ХІ міжнародної науково-технічної конференції, 8 листопада 2022 р. Київ: НУХТ, 2022. С. 339–340.
15. Якимчук В., Гавва О., Якимчук М. Дослідження піднімально-опускних механізмів пакетоформуєчих машин за критерієм мінімізації витрат енергії. *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті* : матеріали 89 міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 3-7 квітня 2023 р. Київ: НУХТ, 2023. Ч.2. С. 45–46.
16. Якимчук М. В., Гавва О. М., Якимчук В. М. Захоплювальні пристрої для пакувальної індустрії. *Упаковка*. 2020. № 4-5. С.48–51.
17. Невлюдов І. Ш. Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації: підручник. Кривий Ріг: ККНАУ, 2017. 444 с.
18. Трегуб В. Г. Пролектування систем автоматизації: навч. посіб. Київ: Ліра-К, 2014. 344 с.
19. Автоматизація виробничих: підручник / І. В. Ельперін та іг. Київ: Ліра-К, 2015. 378 с.

20. Бацуля Р. В. Аналіз сучасних розробок у сфері робототехніки. «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2023: collection of Students Scientific Paper. 2023. Part 1. P. 9-14.
21. Павленко І. І. Промислові роботи та РТК: монографія. Кропивницький: Лисенко В. Ф., 2016. 492 с.
22. Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні: підручник / Л. Є. Пелевін та ін. Київ : НУБА, 2016. 258 с.
23. Design optimization and control of appropriate actuation mechanisms in hinged robots for energy efficiency / W. Roosting et al. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2016. № 1(2). P. 1110-1117.
24. Lynch K. M., Park F. C. Modern Robotics: Mechanics, Planning and Control. Cambridge University Press, 2017. 642 p.
25. Голотюк М. В. Перспективи робототехніки в машинобудуванні. *XX наукова конференція Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя*, 17-18 травня 2017 р. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2017. С. 17–18.
26. Імшенецький Я. О., Цимбал О. М. Розроблення технічних засобів маніпуляційної системи мобільного робота Festo Robotino. *Сучасні аспекти та перспективні напрямки розвитку науки : матеріали II міжнародної студентської наукової конференції*, 2021 р. Мукачево, 2021. Т.3. С. 41–44.
27. Голубєв Л. П., Ківа І. Л., Цись Б. І. Модернізація системи керування промислового маніпулятора. *Технології та дизайн*. 2020. № 2 (35). С. 1–10.
28. Жук А. І., Галаган Р. М. Застосування роботизованих систем в неруйнівному контролі. *Погляд у майбутнє приладобудування : збірник тез доповідей*, 15-16 травня 2018 р. Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2018. С. 403–406.
29. Technical data for the IRB 120 industrial robot [Електронний ресурс] // 1. – 2018. URL: <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-120/irb-120-data>.
30. АBB [Електронний ресурс]. URL: <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-4400/irb-4400-cad>.
31. Поліщук М. М., Ткач М. М. Робототехнічні системи: проектування і

моделювання : навч. посіб. Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2021. 112 с.

32. Павленко І. І., Мажара В. А. Роботизовані технологічні комплекси : монографія. Кропивницький : Видавництво ТОВ «КОД», 2019. 382 с.

33. Промислові роботи в лініях пакування (перспективи використання) / М. В. Якимчук та ін. *Упаковка*. 2019. №2. С. 46–49.

34. Промислові роботи в лініях пакування (перспективи використання) Ч.2 / М.В. Якимчук та ін. *Упаковка*. 2019. № 3. С. 41–45.

35. Якимчук В. М., Гавва О. М. Особливості компоновання зон робочого сервісного простору робототехнічних комплексів пакування. *Новітні технології пакування* : матеріали доповідей XVII науково-практичної конференції молодих вчених, 20 квітня 2018. С. 64–66.

36. Якимчук В., Гавва О. Дослідження компоновання зон робочого сервісного простору робототехнічного комплексу для пакування харчової продукції. *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті* : матеріали 84-ї міжнародної наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів, 23–24 квітня 2018 р. Київ: НУХТ, 2021. Ч.2. С. 116–117.

37. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Крушельницький В. В. Мехатроніка : підручник. Київ : НУБІП, 2020. 404 с.

38. Якимчук В. М., Гавва О. М. Особливості компоновання зон робочого сервісного простору робототехнічних комплексів пакування. *Інновації молоді - машинобудуванню (Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка)* : матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів, 18–22 травня 2018 р. Київ: НТУУ КПІ ім. І. Сікорського, 2018. С. 1–3.

39. Сучасні електромехатронні комплекси та системи : навч. посібник / Т. П. Павленко та ін. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 102 с.

40. Введение в мехатронику : учеб пособие / А. И. Грабченко и др. Харьков : НТУ «ХПИ», 2014. 264 с.

41. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Човнюк Ю. В. Мехатроніка : навч. посіб. Київ : ЦП «Компринт», 2012. 358 с.

42. Janos R., Dobias D. Конструкція промислового робота з підвищеною гнучкістю. *Технічні науки та технології*. 2021. № 4 (14), С. 95–100.
43. Орловський Б. В. Мехатроніка в галузевому машинобудуванні. Київ: КНУТД, 2018. 416 с.
44. Якимчук М. В. Науково-технічні засади створення обладнання для групового пакування харчових продуктів на основі мехатронних модулів : дис. ... д-ра техн. наук : 05.18.12. НУХТ. Київ, 2016. 40 с.
45. Практична електроніка : навч. посіб. / К. В. Галінковський та ін. Київ, Серія конструктор №7, 2017. 90 с.
46. Губарев О. П., Ганпанцурова О. С. Мехатроніка: циклічно-модульний підхід до вирішення практичних задач автоматизації. Київ : НТТУ «КПІ», 2016. 160 с.
47. Орловський Б. В. Мехатроніка в галузевому машинобудуванні : навч. посіб. Київ : КНУТД, 2018. 416 с.
48. Цвіркун Л., Грулер Г. Робототехніка та мехатроніка : навч. посіб. Дніпро : НГУ, 2017. 224 с.
49. Павленко І. І., Годунко М. О. Захватні пристрої роботів : монографія. Кропивницький : ТОВ «КОД», 2020. 386 с.
50. Filaretov V. F., Gubankov A. S., Gornostaev I. V. The formation of motion laws for mechatronics objects along the paths with the desired speed. *Proc. of International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications*, 3-5 October 2016. P. 93–96.
51. Iakymchuk M., Gavva O., Bespalko A. Research of mechatronik linear module with pneumatic drive on the use of proportional pressure regulators. *Journal of food and packaging science, technique and technologies*. 2014. № 3. С. 92–97.
52. Якимчук В. М., Гавва О. М. Дослідження похибки позиціонування робочих органів функціональних модулів із пневматичним сервоприводом у пакетоформувальних машинах. *Новітні технології пакування* : матеріали доповідей XX науково-практичної конференції молодих вчених, 2021. С. 25–29.

53. Мехатронний модуль покрокового накопичення шарів вантажів з рекуператором енергії : пат. 123968 Україна. № а201906056 ; заявл. 31.05.2019, опубл. 30.06.2021, Бюл. № 26. 2 с.

54. Мехатронний модуль лінійного переміщення з функцією рекуперації енергії: пат. 117969 Україна. № u201612898 ; заявл. 19.12.2016, опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20. 3 с.

55. Мехатронний захоплювальний пристрій для пляшок : пат. 120623 Україна. № u201705198 ; заявл. 29.05.2017, опубл. 10.11.2017, Бюл. № 21. 3 с.

56. Мехатронний модуль лінійного переміщення з функцією рекуперації енергії: пат. 117262 Україна. № u201612907 ; заявл. 19.12.2016, опубл. 26.06.2017, Бюл. № 12. 3 с.

57. Неповноповоротний пневмодвигун з демпфером : пат. 121552 Україна. № u201705903 ; заявл. 13.06.2017, опубл. 11.12.2017, Бюл. № 23. 2 с.

58. Мехатронний захоплювальний пристрій для пляшок : пат. 119481 Україна. № а201705197; заявл. 29.05.2017, опубл. 25.06.2019, Бюл. № 12. 4 с.

59. Мехатронний пневматичний модуль з синхронізацією лінійних переміщень штоків в протифазі та функцією рекуперації енергії : пат. 139489 Україна. № u201906055 ; заявл. 31.05.2019, опубл. 10.01.2020, Бюл. № 1. 3 с.

60. Кривопляс-Володіна Л. О., Токарчук С. В. Функціональні мехатронні модулі в структурі пакувального обладнання. *Modern scientific challenges and trends/* 2018. Issue 5. P. 88–95.

61. Кривопляс-Володіна Л. О. Дослідження функціональних мехатронних модулів в структурі синтезу пакувальних машин. *Новітні технології пакування: матеріали доповідей XVII науково-практичної конференції молодих вчених*, 20 квітня 2018 р. С. 60–64.

62. Мехатронний модуль покрокового накопичення шарів вантажів з рекуператором енергії : пат. 139490 Україна. № u201906057 ; заявл. 31.05.2019, опубл. 10.01.2020, Бюл. № 1. 2 с.

63. Мехатронний пневматичний модуль з синхронізацією лінійних переміщень штоків в протифазі та функцією рекуперації енергії : пат. 123561 Україна. № а201906054 ; заявл. 31.05.2019, опубл. 21.04.2021, Бюл. № 16. 2 с.
64. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи : навч. посіб. / Ю. А. Буренніков та ін. Вінниця: ВНТУ, 2014. 238 с.
65. Ковальов І. О., Ратушний О. В. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи : навч. посіб. Суми : СДУ, 2016. 250 с.
66. Колісниченко Е. В., Мандрика А. С., Панченко В. О. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи : конспект лекцій. Суми : СДУ, 2021. 176 с.
67. Павленко Т. П., Шавкун В. М., Козлова О. С. Сучасні електромехатронні комплекси і системи : підручник. Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2021. 265 с.
68. Технологічне оснащення, гідравліка, гідро- та пневмоприводи : навч. посіб. / Н. О. Макаренко та ін. Краматорськ : ДДМА, 2021. 155 с.
69. Пелевін Л. Є., Міщук Д. О. Гідравліка та приводи механотронних систем : нав. підруч. Київ : КНУБА, 2016. 191 с.
70. Іванчук Я. В., Іскович-Лотоцький Р. Д. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи: навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2019. 182 с.
71. Якимчук В. М., Гавва О. М. Моделювання пневматичної системи позиціонування сервоприводів в пакетоформувальних машинах. *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті* : матеріали 87 міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 15–16 квітня 2021 р. Київ: НУХТ, 2021. Ч. 2. С. 19.
72. Сервоприводи в пакувальному обладнанні [Електронний ресурс] // 1. – 2018. URL: <http://www.proelectro.info/content/detail/3679>.
73. Використання сервоприводів при автоматизації обладнання [Електронний ресурс] // 1. – 2018. URL: <http://bezremonta.net/elektrika/2859-.html>.
74. Видмиш А. А., Ярошенко Л. В. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. : навч. посіб. Вінниця : ВНАУ, 2020. 387 с.

75. Основи електропривода виробничих машин та комплексів : навч. посіб. / В.Е. Воскобойник та ін. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2021. 254 с.
76. Бородай В. А., Савченко С. Б., Боровик Р. О. Практична схемотехніка в електроприводі : навч. посіб. Дніпропетровськ : НГУ, 2014. 183 с.
77. Колб А. А., Колб А. А. Теорія електроприводу: навч. посіб. Дніпропетровськ: НГУ, 2011. 540 с.
78. Теряєв В. І. Автоматизований електропривод. Частина 2 : навч. посіб. Київ: НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 204 с.
79. Кривопляс-Володіна Л. О., Гавва О. М., Токарчук С. В. Дослідження електропривода з лінійним двигуном для пакетоформувань машин. *Харчова наука і технології*. 2017. Т. 11. Вип. 3. С. 111–118.
80. Теряєв В. І., Король С. В. Системи програмного та слідкуючого керування рухом : підручник. Київ : НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 150 с.
81. Григор'єв А. С., Мироненко П. С. Розробка стенду для дослідження характеристик приводів і систем автоматизації і керування. *Ефективність та Автоматизація інженерних рішень*. 2020. № 1. С. 22–24.
82. Якимчук В. М., Гавва О. М. Дослідження роботи лінійних електродвигунів в мехатронних модулях обладнання формування транспортних пакетів. *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті* : матеріали 86 міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 2-3 квітня 2020 р. Київ: НУХТ, 2020. Ч.2. С. 36.
83. Субботін С. О. Нейронні мережі: теорія та практика : навч. посіб. Житомир: О. О. Євенок, 2020. 184 с.
84. Машинне навчання : навч. посіб. / Т. М Басюк та ін. Львів : Новий Світ - 2000, 2021. 315 с.
85. Кононова К. Ю. Машинне навчання: методи та моделі : підручник. Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2020. 301 с.
86. Мудрий І. Б. Локалізація та класифікація об'єктів на зображенні. *Інформаційні моделі, системи та технології* : праці X науково-технічної конференції, 7-8 грудня 2022 р. Тернопіль, 2022. С. 87.

87. Depthsynth: real-time realistic synthetic data generation from cad models for 2.5D recognition / B. Planche et al. arXiv:1702.08558, 2017.
88. Domain randomization for transferring deep neural networks from simulation to the real world / T. J. Fong et al. arXiv:1703.06907, 2017.
89. Механизмы интеллектуальных обратных связей, обработки знаний и самообучения в системах управления автономными роботами и мультиагентными робототехническими группировками / В. М. Лохин и др. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2015. Т. 16. № 8. С. 545–555.
90. Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments / V. K. Pshikhopov et al. Butterworth-Heinemann : Elsevier, 2017. 312 p.
91. Timoshin Y., Shevchenko M. Intellectual control system for a group of mobile robots. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2021. Т. 2. № 39. С. 106–114.
92. Комп'ютеризована система керування роботом МП-11 на базі вільнопрограмованого контролера FESTO FC620 FST / Д. О. Лозінський та ін. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2013. № 2. С. 28–32.
93. Investigation of the rupture surface of the titanium alloy using convolutional neural networks / I. Konovalenko et al. *Materials*. 2018. 11, 2467.
94. Теорія систем керування: підручник / В. І. Корнієнко та ін. Дніпро : НГУ, 2017. 497 с.
95. Franklin G., Powell J., Emami-Naeini A. Feedback control of dynamic systems. Harlow : Pearson, 2020. 924 p.
96. Features of Industrial Robots [Електронний ресурс] URL: [https://www.tuchemnitz.de/phil/english/sections/linguist/independent/kursmaterialien/TechCom/achtml/class\\_ex.html](https://www.tuchemnitz.de/phil/english/sections/linguist/independent/kursmaterialien/TechCom/achtml/class_ex.html)
97. Robot Path Control [Електронний ресурс] URL: <https://www.slideshare.net/ErPrabhakar1/robot-path-control>
98. Общая характеристика систем управления промышленных роботов [Електронний ресурс] URL: [https://studme.org/125175/tehnika/obschaya\\_harakteristika\\_sistem\\_upravleniya\\_promyshlennyh\\_robotov](https://studme.org/125175/tehnika/obschaya_harakteristika_sistem_upravleniya_promyshlennyh_robotov)

99. Семенцов Г. Н., Головата Ю. Б. Інтелектуальні системи керування технологічними процесами : навч. посіб. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2012. 173с.
100. Маник К. А., Гурко О. Г. Система керування роботом ПР-2П. *KIT-2020* : матеріали конференції, 25 листопада 2020 р. Харків: ХНАДУ, 2020. С. 1–5.
101. Якимчук В. М., Гавва О. М. Управління мехатронними модулями пакувальних машин за критерієм ефективного використання енергетичних ресурсів. *Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті євроінтеграції* : тези матеріалів VIII міжнародної науково-технічної конференції, 5-6 листопада 2019 р. Київ: НУХТ, 2019. С.23–24.
102. Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні : підруч. / Л. Є. Пелевін та ін. Київ : Інтерсервіс, 2016. 258 с.
103. Поліщук М. М. Принципи синтезу мобільних роботів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського*. 2018. Т. 29 (68) № 5. С. 1–8.
104. Функціонально-модульне проектування пакувальних машин / О. М. Гавва та ін. Київ : Сталь, 2015. 547 с.
105. Якимчук М. В., Гавва О. М., Якимчук В. М. Особливості багатокритеріального структурно-параметричного оптимізаційного синтезу типових функціональних модулів машин формування збільшених вантажних одиниць. *Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції* : програма та тези матеріалів X міжнародної науково-технічної конференції, 9-10 листопада 2021 р. Київ: НУХТ, 2021. С. 67–69.
106. Кривопляс-Володіна Л. О. Багатокритеріальний синтез мехатронних функціональних модулів машин пакування харчових продуктів : дис. ... д-ра техн. наук : 05.18.12. НУХТ. Київ, 2016. 325 с.
107. Якимчук В., Гавва О. Багатокритеріальний структурно-параметричний оптимізаційний синтез типових функціональних модулів в обладнанні для формування збільшених вантажних одиниць. *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті* : матеріали 88

міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, квітень-травень 2022 р. Київ: НУХТ, 2022. Ч.2. С. 32.

108. Towards cleaner production: a roadmap for predicting product end-of-life costs at early design concept / W. M. Cheung et al. *Journal of Cleaner Production*. 2015. № 85. P. 431–441.

109. Соколенко А. І., Степанець О. І., Бойко О. О. Енергетичні трансформації в механічних системах. *Харчова промисловість*. 2019. № 26. С. 140–150.

110. Рекуперація енергії в пневматичному приводі функціонального мехатронного модуля накопичення шарів вантажів / М. В. Якимчук та ін. *Наукові праці НУХТ*. 2018. Т. 24. № 6. С.119–130.

111. Якимчук В. М., Гавва О. М. Ефективне використання енергетичного ресурсу в мехатронних модулях пакувальних машин. *Наукові праці НУХТ*. 2019. Т. 25. № 5. С. 56–63.

112. Javied T., Kimmig F., Franke J. Demand-based dimensioning of compressed air systems for energy optimization and flexibility. *Control. Automation and Robotics: 4<sup>th</sup> International Conference*. April 2018. P. 492–497.

113. Якимчук В. М., Гавва О. М. Використання енергозберігаючих вантажних платформ в робототехнічних комплексах для пакування упаковок з харчовим продуктом. *Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентноздатності* : матеріали VII міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції, 13 вересня 2018 р. Київ: НУХТ, 2018. С. 144–147.

114. Рекуперація енергії в пневматичному приводі функціонального мехатронного модуля накопичення шарів вантажів / М. В. Якимчук та ін. *Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції* : програма та тези матеріалів VII міжнародної науково-технічної конференції, 6-7 листопада 2018 р. Київ: НУХТ, 2018. С. 34–35.

115. Якимчук В. М., Гавва О. М. Мінімізація витрат енергії при формуванні транспортного пакета промисловими робототехнічними комплексами. *Новітні*

технології пакування : матеріали доповідей XVIII науково-практичної конференції молодих вчених, 12 квітня 2019 р. Київ, 2019. С. 66–70.

116. Polishchuk M. N. Modernization of the vacuum gripper of the mobile walking robot. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2017. № 2 (80). P. 59–64.

117. Якимчук В. М., Гавва О. М. Управління мехатронними модулями пакувальних машин за критерієм ефективного використання енергетичного ресурсу. *Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності* : збірник праць VIII міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції, 12 вересня 2019 р. Київ, 2019. С.126-128.

118. New metric for wrench space reachability of multifingered hand with contact uncertainties / A. Caldas et al. *2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 8-11 July 2014. P. 1236–1242.

119. Wolf A., Schunk H. Grippers in motion: the fascination of automated handling tasks. Munich: Hanser, 2018. 331 p.

120. Finger design automation for industrial robot grippers: a review / M. Honarpardaz et al. *Robotics and autonomous systems*. 2017. № 87. P. 104–119.

121. Causey G. C., Quinn R. D. Gripper design guidelines for modular manufacturing. *Proceedings. 1998 IEEE: International Conference on Robotics and Automation*, May 1998. P. 1453–1458.

122. State of the art robotic grippers and applications / K. Tai et al. *Robotics*. 2016. № 5(2), 11. P. 1–20.

123. Мажара В. А., Годунко М. О., Шматько С. С. Дослідження впливу конструктивних параметрів адаптивного захватного пристрою на сили затиску. *Наукові записки*. 2015. № 18. С. 71–79.

124. Павленко І. І., Годунко М. О., Захватні пристрої роботів: навч. посіб. Кіровоград: Лисенко В. Ф., 2014. 368 с.

125. Мажара В. А., годинко М. О., Кислун О. А. Визначення кутів повороту ведучих ланок адаптивного захватного пристрою. *Збірник наукових праць КНТУ*.

*Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* 2014. № 27. С. 28–33.

126. Арендаренко В. М., Іванов О. М. Вакуумна техніка та технологій : навч. посіб. Полтава : ПДАА, 2019. 68 с.

127. Митропольський І. Є., Грицак Р. В. Вакуумна техніка : навч. посіб. Ужгород: УНУ «Говерла», 2018. 138 с.

128. Дослідження впливу конструкцій захоплювальних пристроїв на динаміку роботи лінійних двигунів у мехатронних модулях переміщення упаковок / М. В. Якимчук та ін. *Харчова промисловість.* 2020. № 27. С. 114–125.

129. Savkiv V., Mykhailyshyn R., Duchon F. Gasdynamic analysis of the Bernoulli grippers interaction with the surface of flat objects with displacement of the center of mass. *Vacuum.* 2019. Vol. 159. P. 524–533.

130. Justification of design and parameters of Bernoulli–vacuum gripping device / V. Savkiv et al. *International Journal of Advanced Robotic Systems.* 2017. Vol. 14 (6). P. 1–10.

131. Вплив інерційних і геометричних параметрів вакуумних захоплювальних пристроїв на допустиме зусилля утримання тарноштучних вантажів / М. В. Якимчук та ін. *Наукові праці НУХТ.* 2020. Т. 26. № 5. С. 65–74.

132. Параска Г. Б., Прибега Д. В., Майдан П. С. Методи та засоби експериментальних досліджень : навч. посіб. Київ : Кондор, 2017. 138 с.

133. Стрижало В. О., Бородій М. В. Експериментальні методи в механіці деформівного твердого тіла : навч. посіб. Київ: НТУУ КПІ ім. І. Сікорського, 2022. 306 с.

134. Богданов В. Л., Жук Я. О., Богданова О. С. Основи експериментальних методів механіки деформівного твердого тіла : навчальний посібник. Київ : Академперіодика, 2016. 278 с.

135. Бородій М. В., Адамчук М. П., Стрижало В.О. Конкретизація параметрів експоненціального ядра спадковості ендохонної теорії при опису ратчетингу за двовісного навантаження. *Проблеми міцності.* 2018. №4. С. 156–167.

136. Смирний М. Ф. Основи наукових досліджень : конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 111 с.
137. Серікова О. М. Методи обробки статистичних даних : курс лекцій. Харків : НУЦЗУ, 2019. 198 с.
138. Костюк В. О. Прикладна статистика: навч. посібник. Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2015. 191 с.
139. Важинський С. Е., Щербак Т. І. Методика та організація наукових досліджень : навч. посіб. Суми: СДПУ ім. А. С. Макаренка, 2016. 260 с.
140. Адаменко М. І., Бейлін М. В. Основи наукових досліджень. Харків : ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2014. 188 с.
141. Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні : підруч. / Л. Є. Пелевін та ін. Київ : Інтерсервіс, 2016. 258 с.
142. Кривопляс А.П. Пакетоформирующие машины / А.П. Кривопляс, А.А. Кукибный и др. — М. : Машиностроение, 1982. — 239 с.
143. Беспалько А.П. Коэффициенты трения скольжения для тарно-штучных грузов пищевых производств / А.П. Беспалько, Г.Р. Валиулин, А.П. Криво-пляс и др. // Пищевая промышленность. — 1976. — № 22. — С. 62 — 65.
144. Жураховский В.А. Оптимальное по быстродействию перемещения тарных грузов на неподвижной плоскости при ограниченной скорости / В.А. Жураховский, А.П. Кривопляс // Машиностроение. — 1974. — № 12. — С. 92 —96.
145. Голотюк М. В. Розвиток роботомеханічних систем в машинобудуванні. *Вісник Харківського національного технічного університету ім. П. Василенка*. 2018. № 192. С. 248–255
146. Vagas M. Methodological process for creation of palletizing. *Technical sciences and technologies*. 2016. № 6 (4). P. 189–193.
147. Hajduk M. Principles of formation of flexible manufacturing systems. *Technical Gazette*. 2018. № 3 (25). P. 649–654.
148. Balaz V. Design of automated robotized system with two robots. *Computer Aided Production Engineering*. 2013. P. 131–136.

149. Семейон Я., Kostka J., Мако Р. Використання імітаційної програми для проектування й оптимізації лінії виробництва. *Технічні науки та технології*. 2018. № 3(13). С.61–67.
150. Грачев Ю.П. Математические методы планирования экспериментов / Ю.П. Грачев. — М. : Пищ. пром-сть, 1979. — 200 с.
151. Цимбал О. М., Бронніков А. І. Системи адаптації роботів і технологія OpenCV : навч. посіб. Харків : ХНУРЕ, 2019. 148 с.
152. Intelligent decision-making support for flexible integrated manufacturing / O. Nevliudov et at. Riga : ISMA, 2020. 390 p.
153. Nevlyudov I., Tsymbal O., Bronnikov A. Intelligent means in the system of managing a manufacturing agent. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2018. № 1 (3). С. 33–47.
154. Sendon A., Dauzere-Peres S., Pinaton J. Simulation model to control risk levels on process equipment through metrology in semiconductor manufacturing. *Proceeding of the 2015 Winter Simulation Conference, December 2015*. P. 2941–2952.
155. Писаренко С. Г. Оптимізація режимів технологічних операцій роботів вертикального переміщення : кваліф. робота ... магістра : 126. КПІ ім. І. Сікорського. Київ, 2019. 106 с.
156. Поліщук М. М., Писаренко С. Г. Система управління мобільним роботом з підвищеним ступенем інтелектуальності. *ЛОГОС. Мистецтво наукової думки*. 2019. №3. С. 101–103.
157. Основи наукових досліджень у прикладних задачах / Л. О. Кривопляс-Володіна та ін. Київ : Сталь, 2016. 271 с.
158. Касьянова Н. В. Впровадження стратегії енергозбереження на промислових підприємствах. *Ефективна економіка*. 2017. № 2. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5916>.
159. Кітченко О. М. Удосконалення системи формування та використання потенціалу енергозбереження промислових підприємств. *Економіка розвитку*. № 1 (61). 2012. С. 68–73.

160. Evaluation of product recyclability at the product design phase: a time-series forecasting methodology. / Z. Li et al. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2017. № 31 (4-5). P. 457–468.

161. Towards cleaner production: a roadmap for predicting product end-of-life costs at early design concept / W. M. Cheung et al. *Journal of Cleaner Production*. 2015. № 85. P. 431–441.

Додаток А

Таблиця 3.7

Результати експертного оцінювання критеріїв  
за їх значувальністю для кластеру  $M_1$

№ Експерта	Ранг критеріїв кластеру $M_1$							
	Кр101	Кр102	Кр103	Кр104	Кр111	Кр112	Кр113	Кр114
1	1	2	3	4	3	1	2	4
2	3	1	4	2	4	2	3	1
3	4	3	2	1	1	3	4	2
4	3	2	4	1	3	1	2	4
5	2	4	1	3	4	1	2	3
6	3	1	4	2	1	2	4	3
7	4	3	1	2	2	1	3	4
8	1	2	3	4	4	3	1	2
Сума рангів	21	18	22	19	22	14	21	23
Середній арифметичний ранг	2,625	2,25	2,75	2,375	2,75	1,75	2,625	2,875
Підсумковий ранг	3	1	4	2	3	1	2	4
Загальний вигляд ранжованого ряду	Кр102<Кр104<Кр101<Кр103				Кр112<Кр113<Кр111<Кр114			

Таблиця 3.8

Результати експертного оцінювання критеріїв  
за їх значувальністю для кластеру  $M_2$

№ Експерта	Ранг критеріїв кластеру $M_2$						
	Кр211	Кр212	Кр213	Кр214	Кр215	Кр216	Кр217
1	2	3	4	1	5	6	7
2	7	1	3	6	2	4	5
3	4	2	1	7	3	5	6
4	5	6	1	3	4	7	2
5	1	2	7	5	3	6	4
6	6	1	4	5	2	7	3
7	3	5	7	4	1	2	6
8	7	3	1	6	4	2	5
Сума рангів	35	23	28	37	24	39	38
Середній арифметичний ранг	4,375	2,875	3,5	4,625	3	4,875	4,75
Підсумковий ранг	4	1	3	5	2	7	6
Загальний вигляд ранжованого ряду	Кр212<Кр215<Кр213<Кр211<Кр214<Кр217<Кр216						

Таблиця 3.9

**Результати експертного оцінювання критеріїв  
за їх значувальністю для кластеру  $M_3$**

№ Експерта	Ранг критеріїв кластеру $M_3$						
	Кр311/321	Кр312/322	Кр313/323	Кр314/324	Кр315/325	Кр316/326	Кр317/327
1	3	7	5	4	1	2	6
2	5	6	7	1	3	4	2
3	1	3	2	4	5	6	7
4	4	1	6	2	7	3	5
5	7	3	1	5	2	4	6
6	2	5	4	7	1	6	3
7	6	7	5	4	1	2	3
8	5	4	7	3	2	1	6
Сума рангів	33	36	37	30	22	28	38
Середній арифметичний ранг	4,125	4,5	4,625	3,75	2,75	3,5	4,75
Підсумковий ранг	4	5	6	3	1	2	7
Загальний вигляд ранжованого ряду	Кр315/325<Кр316/326<Кр314/324<Кр311/321<Кр312/322<Кр313/323<Кр317/327						

Таблиця 3.10

**Результати експертного оцінювання критеріїв  
за їх значувальністю для кластеру  $M_4$**

№ Експерта	Ранг критеріїв кластеру $M_4$							
	Кр411	Кр412	Кр413	Кр414	Кр421	Кр422	Кр423	Кр424
1	1	2	3	4	3	1	4	2
2	4	1	2	3	4	3	2	1
3	2	4	1	3	1	2	3	4
4	3	2	4	1	2	1	4	3
5	1	3	2	4	1	3	1	2
6	2	1	4	3	3	2	4	1
7	3	1	2	4	4	1	3	2
8	4	2	3	1	1	4	2	3
Сума рангів	20	16	21	23	19	17	23	18
Середній арифметичний ранг	2,5	2	2,625	2,875	2,375	2,125	2,875	2,25
Підсумковий ранг	2	1	3	4	2	1	4	3
Загальний вигляд ранжованого ряду	Кр412<Кр411<Кр413<Кр414				Кр422<Кр421<Кр424<Кр423			

## Додаток Б

```
% Параметри системи
m1 = 12; % Перша маса (кг)
m2 = 15; % Друга маса (кг)
Cp = 300; % Жорсткість паса Cp (Н/м)
Fo = 180; % Сила опору Fo (Н)
Fp0 = 0; % Початкове значення результуючої сили Fp (Н)
% Параметри руху
A = 0.2 % Амплітуда синусоїди (м)
frequency = 0.1; % Частота синусоїди (Гц)
phi = pi / 2; % Фаза синусоїди
t0 = 0; % Початковий час (с)
t_end = 1.5; % Кінцевий час (с)
time_step = 0.01; % Крок ітерації (с)

% Додаткові параметри
d_sh = 0.1; % Діаметр шківa (м)
i = 1; % Передаточне число редуктора
KKD = 0.9; % Коефіцієнт корисної дії

% Ініціалізація змінних
x1 = 0; % Початкове положення першої маси (м)
v1 = 0; % Початкова швидкість першої маси (м/с)
a1 = 0; % Початкове прискорення першої маси (м/с²)
x2 = 0; % Початкове положення другої маси (м)
v2 = 0; % Початкова швидкість другої маси (м/с)
a2 = 0; % Початкове прискорення другої маси (м/с²)
t = t0; % Початковий час (с)

% Зберігання результатів обчислень
max_iterations = round(t_end / time_step); % Максимальна кількість ітерацій
t_values = zeros(1, max_iterations); % Попереднє виділення пам'яті для часу
x1_values = zeros(1, max_iterations); % Попереднє виділення пам'яті для x1
x2_values = zeros(1, max_iterations); % Попереднє виділення пам'яті для x2
a1_values = zeros(1, max_iterations); % Попереднє виділення пам'яті для a1
a2_values = zeros(1, max_iterations); % Попереднє виділення пам'яті для a2
Md_values = zeros(1, max_iterations); % Попереднє виділення пам'яті для Md
Fp_values = zeros(1, max_iterations); % Попереднє виділення пам'яті для Fp
v1_values = zeros(1, max_iterations); % Попереднє виділення пам'яті для v1
v2_values = zeros(1, max_iterations); % Попереднє виділення пам'яті для v2
counter = 1; % Лічильник для індексування результатів

% Додаткові змінні для відстеження обнулення a1 та a2
is_a1_zero = true;
is_a2_zero = true;

% Максимальне значення a2 для зупинки першого етапу руху
max_a2_first_system = 0.1; % Наприклад, 0.1

% Обчислення руху системи рівнянь на етапі розгону
while t <= t_end && counter <= max_iterations
    a1 = (Fp0 - Cp * (x1 - x2) - Cp * (x1 - x2) * (m1 / (m1 + m2)) - Fo) / (m1 + m2) * A *
        cos(2 * pi * frequency * t + phi);
    a2 = (Cp * (x1 - x2) * (m1 / (m1 + m2)) - Fo) / m2 * A * cos(2 * pi * frequency * t +
        phi);

    % Оновлення Fp в залежності від прискорення
    Fp = Fp0 + a1 * m1;
    % Розрахунок моменту Md
    Md = (Fp * d_sh) / (2 * i * KKD);
```

```

v1 = v1 + a1 * time_step;
v2 = v2 + a2 * time_step;
x1 = x1 + v1 * time_step;
x2 = x2 + v2 * time_step;

t_values(counter) = t;
x1_values(counter) = x1;
x2_values(counter) = x2;
a1_values(counter) = a1;
a2_values(counter) = a2;
Fp_values(counter) = Fp;
Md_values(counter) = Md;
v1_values(counter) = v1;
v2_values(counter) = v2;

% Перевірка, чи a1 більше за максимальне значення a2 для зупинки першого етапу руху
if a2 > max_a2_first_system
    break; % Зупинка першого етапу руху
end

% Перевірка, чи a1 стає близьким до нуля
if is_a1_zero && abs(a1) < 1e-5
    is_a1_zero = false; % Змінюємо флаг, оскільки a1 більше не дорівнює нулю
end

t = t + time_step; % Ітерація часу
counter = counter + 1; % Інкремент лічильника
end

% Оновлення змінних для етапу гальмування
x1_second_system = x1;
x2_second_system = x2;
v1_second_system = v1;
v2_second_system = v2;
t0_second_system = t;
counter_second_system = counter;

% Обчислення руху для етапу гальмування (після завершення етапу розгону)
while t <= t_end && counter <= max_iterations
    a1 = (Fp0 - Cp * (x1 - x2) - Cp * (x1 - x2) * (m1 / (m1 + m2)) - Fo) / (m1 + m2) * A *
cos(2 * pi * frequency * t + phi);
    a2 = (Cp * (x1 - x2) * (m1 / (m1 + m2)) - Fo) / m2 * A * cos(2 * pi * frequency * t +
phi);

    % Оновлення Fp в залежності від прискорення
    Fp = Fp0 + a1 * m1;

    % Розрахунок моменту Md
    Md = (Fp * d_sh) / (2 * i * KKD);

    v1 = v1 + a1 * time_step;
    v2 = v2 + a2 * time_step;
    x1 = x1 + v1 * time_step;
    x2 = x2 + v2 * time_step;
    t_values(counter) = t;
    x1_values(counter) = x1;
    x2_values(counter) = x2;
    a1_values(counter) = a1;
    a2_values(counter) = a2;

```

```

Fp_values(counter) = Fp;
Md_values(counter) = Md;
v1_values(counter) = v1;
v2_values(counter) = v2;

% Перевірка, чи a2 стає дуже близьким до нуля
if is_a2_zero && abs(a2) < 1e-5
    break; % Зупинка розрахунку етапу гальмування
end

t = t + time_step; % Ітерація часу
counter = counter + 1; % Інкремент лічильника
end

% Обрізка надлишкових значень у масивах результатів
t_values = t_values(1:counter - 1);
x1_values = x1_values(1:counter - 1);
x2_values = x2_values(1:counter - 1);
a1_values = a1_values(1:counter - 1);
a2_values = a2_values(1:counter - 1);
Fp_values = Fp_values(1:counter - 1);
Md_values = Md_values(1:counter - 1);
v1_values = v1_values(1:counter - 1);
v2_values = v2_values(1:counter - 1);

% Побудова графіків для етапів розгону та гальмування
figure;

subplot(4, 1, 1);
plot(t_values, x1_values, 'b', 'LineWidth', 2);
hold on;
plot(t_values, x2_values, 'r', 'LineWidth', 2);
xlabel('Час (с)');
ylabel('Положення (м)');
title('Графік положення першої та другої маси');
legend('Перша маса', 'Друга маса');
grid on;

subplot(4, 1, 2);
plot(t_values, a1_values, 'b', 'LineWidth', 2);
hold on;
plot(t_values, a2_values, 'r', 'LineWidth', 2);
xlabel('Час (с)');
ylabel('Прискорення (м/с²)');
title('Графік прискорення першої та другої маси');
legend('Перша маса', 'Друга маса');
grid on;

subplot(4, 1, 3);
plot(t_values, Fp_values, 'g', 'LineWidth', 2);
xlabel('Час (с)');
ylabel('Результуюча сила Fp (Н)');
title('Графік результуючої сили Fp');
grid on;

subplot(4, 1, 4);
plot(t_values, Md_values, 'm', 'LineWidth', 2);
xlabel('Час (с)');
ylabel('Момент Md (Н*м)');
title('Графік моменту Md');
grid on;

```

## Додаток В

### Визначення кількості повторів для проведення експерименту по дослідженню фізико-механічних параметрів вакуумних захоплюючих пристроїв мехатронного модуля для тарних вантажів

Методика проведення експериментів для оцінки дисперсії розсіювання результатів [ 151, 158 ]:

1) За результатами проведення вимірів, кількість повторів яких становила десять знаходимо середньоарифметичну величину виміру:

$$a_c = (a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n) / n \quad (1)$$

де,  $a_c$  – середньоарифметична величина виміру;  $a_1, a_2, \dots$  і т.д. – значення одиничних вимірів;  $n$  – кількість вимірів.

Десять повторів дослідження експерименту взято з умови, що, чим більше  $n$ , тим більша точність, яка ближче до істинного значення результату.

2) Розраховуємо відхилення кожного результату:

$$P_1 = a_1 - a_c; P_2 = a_2 - a_c \text{ і т. д. } P_n = a_n - a_c \quad (2)$$

3) Розраховуємо середньоарифметичну величину відхилень

$$P_c = (|P_1| + |P_2| + |P_3| + \dots + |P_n|) / n \quad (3)$$

4) Розраховуємо відносну похибку при даній кількості повторень  $n$ :

$$\delta = (P_c / a_c) * 100\% \quad (4)$$

Якщо результати відносної похибки не влаштовують – необхідно збільшити величину  $n$ .

5) Знаходимо математичне очікування ( середнє, найбільш імовірне значення випадкової величини, яке у відсутності систематичних похибок відповідає істинному результату експерименту):

$$m_a = \sum a_i P_i \quad (5)$$

де  $P_i$  – імовірність  $i$ -тої події.

6) Розраховуємо дисперсію (міра розсіювання випадкової величини навкруг її математичного очікування):

$$D = (1/n) \sum (a_i - a_c)^2 \quad (6)$$

де  $a_c$  - середньоарифметичне значення  $i$ -тої величини.

7) Тоді середньоквадратичне відхилення для оцінки розсіювання значень випадкової величини становить:

$$\sigma = D^{1/2} \quad (7)$$

Чим менше значення  $\sigma$ , тим меншим буде розсіювання.

8) Залежно від довірної імовірності  $P$  та кількості вимірів  $n$  з таблиці вибирається коефіцієнт Ст'юдента  $t(P)$ . Значення  $P$  задаються в межах 0,800...0,999.

$$9) \text{ Довірча оцінка точності: } \varepsilon \approx \Delta a_i * a_c \quad \text{де } \Delta a_i = 0,02 \quad (8)$$

$$10) \text{ Кількість вимірів в експерименті: } n_{min} \geq [t(P) / \varepsilon]^2 \cdot \sigma^2 \quad (9)$$

**Розрахунок кількості повторів (дублів) під час проведення експерименту по дослідженню фізико-механічних параметрів вакуумних захоплюючих пристроїв мехатронного модуля для тарних вантажів.**

№/№	Назва етапу	Формула	Результат
1	Середньоарифметичну величину виміру	$a_c = (a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n) / n$	$(58,6 + 57,3 + 58,9 + 59,1 + 57,9 + 58 + 58,1 + 57,9 + 59,2 + 58,3) / 10 = 58,3$
2	Розраховуємо відхилення кожного результату	$P_1 = a_1 - a_c; P_2 = a_2 - a_c$	$P_1 = 0,3; P_2 = 1; P_3 = 0,6; P_4 = 0,8;$ $P_5 = 0,4; P_6 = 0,3; P_7 = 0,2; P_8 = 0,4;$ $P_9 = 0,9; P_{10} = 0;$
3	Середньоарифметична величина відхилень	$P_c = ( P_1  +  P_2  +  P_3  + \dots +  P_n ) / n$	$P_c = 0,49$
4	Відносна похибка	$\delta = (P_c / a_c) * 100\%$	$\delta = 0,84$
5	Математичне очікування	$m_a = \sum a_i P_i$	$m_a = 286,12$
6	Дисперсія	$D = (1/n) \sum (a_i - a_c)^2$	$D = 0,235$
7	Середньоквадратичне відхилення	$\sigma = D^{1/2}$	$\sigma = 0,48$
8	Довірча оцінка точності	$\varepsilon \approx \Delta a_i * a_c$ де $\Delta a_i = 0,02$	$\varepsilon \approx 1,17$
9	Коефіцієнт Ст'юдента	$t(P)$ від $(P = 0,989)$	$t(P) = 3,25$
10	Кількість вимірів	$n_{min} \geq [t(P) / \varepsilon]^2 \cdot \sigma^2$	$n_{min} \geq [3,25 / 1,17]^2 \cdot 0,48^2 = 1,77 \approx 2$

Кількість вимірів в експерименті приймаємо  $n = 5$

## Додаток Г

Таблиця 5.9

**Експериментальні значення величини вакууму  $P_{\text{вак}}$  та зусилля утримання тарного вантажу пакованого в гофрокартон марки МО при при тиску повітря в магістралі 5 бар (0,5МПа)**

Діаметр присмоктувача, мм (матеріал)	Величина вакууму, бар	Теоретичне зусилля утримання, Н	Експериментальне зусилля утримання, Н	% запасу по зусиллю
Картон хром – ерзац макулатурний марки МО першого сорту по ТУ У 05509659-008-2000 товщиною 0,40 мм				
30	-0,764	34	37,18	8,6
40	-0,852	53	58,6	9,6
60	-0,892	125	155,4	19,6
Картон хром – ерзац макулатурний марки МО першого сорту по ТУ У 05509659-008-2000 товщиною 0,50 мм				
30	-0,762	34	36,09	5,8
40	-0,858	53	59,8	11,4
60	-0,897	125	157,1	20,4

Таблиця 5.10

**Експериментальні значення величини вакууму  $P_{\text{вак}}$  та зусилля утримання тарного вантажу пакованого в гофрокартон марки НМ при тиску магістралі 5 бар (0,5МПа)**

Діаметр присмоктувача, мм (матеріал)	Величина вакууму, бар	Теоретичне зусилля утримання, Н	Експериментальне зусилля утримання, Н	% запасу по зусиллю
Картон макулатурний марки НМ ТУ У 21.1 - 05509659-008-2001 товщиною 0,40 мм				
30	-0,732	34	38	10,5
40	-0,698	53	56,3	5,9
60	-0,594	125	149,06	16,1
Картон макулатурний марки НМ ТУ У 21.1 - 05509659-008-2001 товщиною 0,50 мм				
30	-0,74	34	36,2	6,1
40	-0,721	53	57,96	8,6
60	-0,624	125	150,02	16,7

Таблиця 5.11

Експериментальні значення величини вакууму  $P_{\text{вак}}$  та зусилля утримання тарного вантажу пакованого в гофрокартон марки Н при тиску магістралі 5 бар (0,5МПа)

Діаметр присмоктувача, мм (матеріал)	Величина вакууму, бар	Теоретичне зусилля утримання, Н	Експериментальне зусилля утримання, Н	% запасу по зусиллю
Картон хром – ерзац макулатурний марки Н першого сорту по ТУ У 05509659-008-2000 товщиною 0,40 мм				
30	-0,726	34	36,13	5,9
40	-0,751	53	55,94	5,3
60	-0,798	125	132,8	5,9
Картон хром – ерзац макулатурний марки Н першого сорту по ТУ У 05509659-008-2000 товщиною 0,50 мм				
30	-0,73	34	36,25	6,2
40	-0,758	53	57,8	8,3
60	-0,649	125	137,01	8,8

Таблиця 5.12

Експериментальні значення величини вакууму  $P_{\text{вак}}$  та зусилля утримання тарного вантажу пакованого в гофрокартон марки ММ при тиску магістралі 5 бар (0,5МПа)

Діаметр присмоктувача, мм (матеріал)	Величина вакууму, бар	Теоретичне зусилля утримання, Н	Експериментальне зусилля утримання, Н	% запасу по зусиллю
Картон макулатурний марки ММ ТУ У 21.1-05509659-020-2001 товщиною 0,40 мм				
30	-0,726	34	36	5,6
40	-0,854	53	57,6	8,0
60	-0,848	125	153,22	18,4
Картон макулатурний марки ММ ТУ У 21.1-05509659-020-2001 товщиною 0,50 мм				
30	0,727	34	38,3	11,2
40	-0,856	53	59,9	11,5
60	-0,85	125	155,04	19,4

## Додаток Д

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «НВО Інта»

Костянтин ЛАСТИК

«20» вересня 2023 р.



## АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи «Структурно-параметричний синтез функціонально-мехатронних модулів робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів із харчовими продуктами», яка виконана аспірантом кафедри «Машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв» Національного університету харчових технологій Якимчуком Владиславом Миколайовичем.

Ми, що нижче підписалися: Міщенко І. В.

Гавва О. М.

склали цей акт про те, що результати теоретичних і експериментальних досліджень параметрів функціонально-мехатронних модулів для формування транспортного пакету передано ТОВ «НВО Інта» для використання під час проектування та виготовлення обладнання даного типу.

На основі результатів досліджень визначено раціональні геометричні, кінематичні і динамічні параметри таких функціонально-мехатронних модулів з пневматичним приводом:

- покрокове переміщення платформи формування структурних елементів транспортного пакету;
- укладання тарного вантажу;
- пристрій захоплення тарних вантажів;

Розрахунковий економічний ефект від впровадження результатів дослідження в один робототехнічний комплекс складатиме 160 789 грн.

[Signature]  
[Signature]

Міщенко І. В.

Гавва О. М.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор ДП «Фесто»  
А.М. Харченко

«15» листопада 2022 р.



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи «Структурно-параметричний синтез функціонально-мехатронних модулів робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів із харчовими продуктами», виконаної Якимчуком Владиславом Миколайовичем.

Цим актом підтверджується, що за період з 2019 р. по 2022 р. компанія «Фесто» успішно реалізувала результати наукових досліджень, виконаних Якимчуком В.М. під час розроблення нових зразків обладнання для формування транспортних пакетів. За цей період були передані і впроваджені наступні матеріали: методика компонування обладнання із функціонально-мехатронних модулів для формування транспортних пакетів; методика побудови функціонально-мехатронних модулів для роботизованих комплексів формування транспортних пакетів; методика розрахунку вакуумних пристроїв захоплювання тарних вантажів; методика синтезу функціонально-мехатронних модулів; які були впровадженні під час виготовлення такого обладнання:

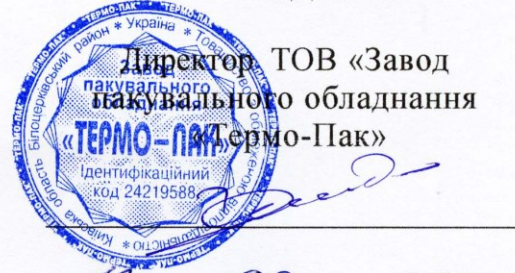
1. порталні автоматичні роботи для формування транспортних пакетів із тарних вантажів;
2. роботизовані комплекси з мехатронних модулів для формування групової упаковки;
3. вакуумні пристрої захоплювання для споживчої упаковки і тарних вантажів;
4. функціонально-мехатронні модулі з пневматичним приводом для горизонтального та вертикального переміщення об'єктів.

У результаті впровадження матеріалів дисертаційної роботи В.М. Якимчука економічний ефект за вказаний період складає 870 096 грн.

Керівник відділу дидактики

Євген  
РИЖЕНКО

ЗАТВЕРДЖУЮ



«12» 06 2023 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи «Структурно-параметричний синтез функціонально-мехатронних модулів робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів із харчовими продуктами», яка виконана аспірантом кафедри «машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв» Національного університету харчових технологій Якимчуком Владиславом Миколайовичем.

Ми, що нижче підписалися:

Юзеф Якимчук  
Олександра Гавва

склали цей акт для підтвердження, що результати теоретичних і експериментальних досліджень, які виконані В.М. Якимчуком передані для використання під час розроблення комплексу обладнання.

У проектних роботах використано методику проектування робототехнічних комплексів формування збільшених вантажних одиниць із харчовими продуктами на основі функціонально-мехатронних модулів, що виконують максимальну кількість корисних функцій та відповідають регламентованим значенням критеріїв технічної ефективності.

Конструкції нового обладнання мають суттєві переваги з попередніми зразками і відрізняються використанням функціонально-мехатронних модулів з максимальним набором функціональних можливостей для формування транспортного пакету у відповідності до вимог виробника.

Очікуваний економічний ефект від впровадження результатів дослідження в один робототехнічний комплекс буде складати 280 256 грн.

Гавва  
Якимчук

Якимчук Р.  
Гавва О.М

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Ректор

Національного університету харчових  
технологій, д.т.н., професор

Олександр ПІВЧЕНКО



2023р.

**АКТ**

про впровадження в Проблемній науково-дослідній лабораторії  
Національного університету харчових технологій  
результатів дисертаційної роботи

**ЯКИМЧУКА ВЛАДИСЛАВА МИКОЛАЙОВИЧА**

Комісія у складі:

Голова комісії: проректор з наукової роботи НУХТ к.т.н., доц. Токарчук С.В.

Члени комісії: к.т.н., с.н.с. Маринін А.І., д.т.н., проф. Пасічний В.М., д.т.н.,  
проф. Мирончук В.Г., д.т.н., проф. Гавва О.М.

Члени комісії провели комплексне оцінювання ефективності впровадження основних результатів дисертаційної роботи Якимчука Владислава Миколайовича, яка подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії. За даними оцінювання встановлено, що нові результати досліджень, які отримано при виконанні дисертації, апробовано й використовувалися в Проблемній науково-дослідній лабораторії (ПНДЛ) Національного університету харчових технологій (НУХТ) при проведенні досліджень у рамках виконання науково-дослідної роботи за рахунок коштів державного бюджету «Науково-технічні засади функціонально орієнтованого проектування машин пакування харчових продуктів у контексті технологій замкненого циклу» (замовник дослідження – МОН України, державний реєстраційний номер 0120U102557, автор – виконавець теми, роки виконання: 2020 – 2022) в якій здобувач був виконавцем окремих етапів.

Комісія констатує, що розроблена здобувачем та науково-обґрунтована методологія проектування спеціалізованих роботизованих комплексів

формування збільшених вантажних одиниць із харчовими продуктами, в основу якої покладено використання функціонально-мехатронних модулів, й входить у дисертаційну роботу Якимчука В.М., використовується в ПНДЛ НУХТ.

Апробація дисертаційних досліджень Якимчука В.М. засвідчила високий рівень наукового обґрунтування результатів, практичну значущість та реалізується в ПНДЛ НУХТ.

Комісія у складі:

Голова комісії:

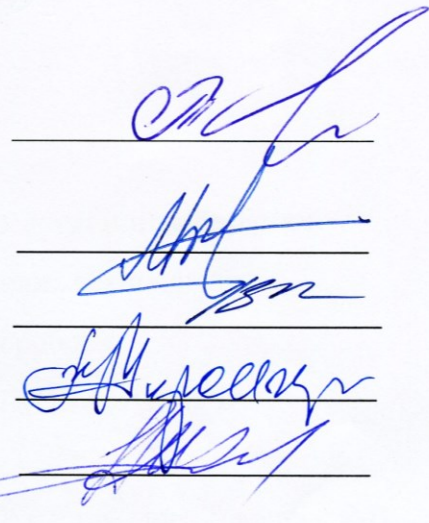
Проректор з наукової роботи  
к.т.н., доц. Токарчук С.В.

Члени комісії:  
завідувач ПНДЛ, к.т.н., с.н.с. Маринін А.І.

д.т.н., проф. Пасічний В.М.

д.т.н., проф. Мирончук В.Г.

д.т.н., проф. Гавва О.М.



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор з наукової роботи НУХТ

Сергій ТОКАРЧУК

2023 р.



АКТ

впровадження результатів науково-дослідних, дослідно-конструкторських і дисертаційних робіт у навчальний процес вищих навчальних закладів

Замовник Національний університет харчових технологій  
(найменування організації)  
д.т.н., проф. Шевченко Олександр  
(П.І. керівника)

Дійсним актом підтверджується, що результати: дисертаційної роботи «Структурно-параметричний синтез функціонально-мехатронних модулів робототехнічних комплексів формування транспортних пакетів із харчовими продуктами» згідно плану держбюджетної науково-дослідної роботи кафедри машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв «Науково-технічні засади створення енергоощадних та ресурсозберігаючих процесів і обладнання харчових, фармацевтичних й поліграфічно-пакувальних виробництв», номер державної реєстрації 0121U100057, термін виконання 2021 – 2025 рр.)  
(найменування виду роботи, найменування теми, № держ. реєстрації)

виконаної на кафедрі машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв  
(найменування кафедри)

виконуваної з жовтня 2019 р. по серпень 2023 р.  
(термін виконання)

впроваджені у навчальний процес кафедри машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв ННІТІ ім. акад. І.С. Гулого, НУХТ  
(найменування структурного підрозділу, де здійснювалось впровадження)

1. Вид впроваджених результатів методики розрахунку функціонально-мехатронних модулів формування транспортного пакету, лабораторна установка для дослідження роботи покрокового опускання платформи з функцією рекуперації енергії, методика та результати проведених досліджень включені до

дисциплін: пакувальне обладнання; машини та технології пакування.  
(технологія, обладнання, методики, тощо)

2. **Форма впровадження:** практичні та лабораторні заняття

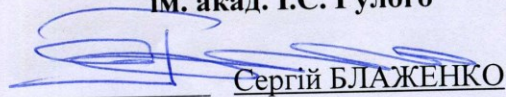
3. **Новизна результатів науково-дослідних робіт:** Патент на винахід UA 123968, МПК F15B 11/06 (2006.01). Мехатронний модуль покрокового накопичення шарів вантажів з рекуператором енергії / Якимчук В.М., Якимчук М.В. заявник Національний університет харчових технологій. – № а201906056; опубл. 30.06.2021, бюл. № 26/2021.; модифіковано лабораторну установку кафедри МАХФВ у відповідності до вищезазначеного патенту;  
(піонерське, принципово нові, якісно нові, модифікація старих розробок)

4. **Перелік курсів і дисциплін, у рамках яких викладені результати НДР:** пакувальне обладнання, машини та технології пакування, розрахунок і конструювання функціонально мехатронних модулів.

5. **Соціальний і науково-технічний ефект** впровадження результатів дослідження (на прикладі пакувальної промисловості) дасть можливість розробити нові мехатронні модулі для спеціалізованих робототехнічних комплексів формування транспортного пакету із харчовими продуктами, виконати оцінку ефективності їх структури шляхом проведення аналізу та синтезу допустимих варіантів їх компонувань.

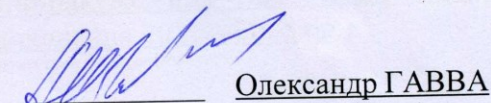
**Директор ННІТІ**

ім. акад. І.С. Гулого

  
Сергій БЛАЖЕНКО  
(підпис) (ім'я, прізвище)

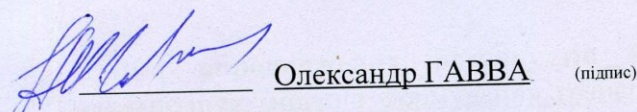
«19» 09 2023р.

**Завідувач кафедри МАХФВ**

  
Олександр ГАВВА  
(підпис) (ім'я, прізвище)

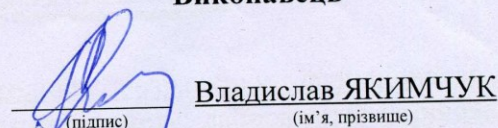
«19» 09 2023р.

**Керівник НДР**

  
Олександр ГАВВА (підпис)  
(ім'я, прізвище)

«19» 09 2023р.

**Виконавець**

  
Владислав ЯКИМЧУК  
(підпис) (ім'я, прізвище)

«19» 09 2023р.

## Додаток Е



**УКРАЇНА**

(19) **UA** (11) **139490** (13) **U**  
 (51) МПК  
**F15B 11/06 (2006.01)**

**МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ  
 ЕКОНОМІКИ, ТОРГІВЛІ ТА  
 СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА  
 УКРАЇНИ**

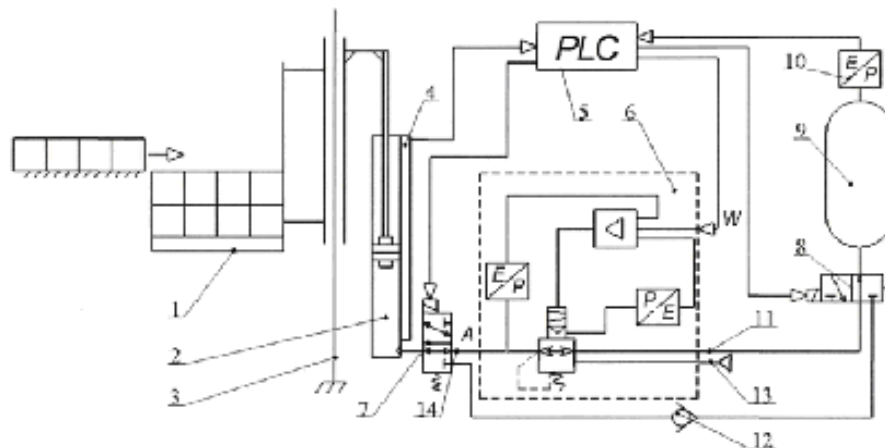
### (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: <b>u 2019 06057</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>31.05.2019</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>10.01.2020</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>10.01.2020, Бюл.№ 1</b></p>	<p>(72) Винахідник(и):  <b>Якимчук Владислав Миколайович (UA),                  Якимчук Микола Володимирович (UA)</b></p> <p>(73) Власник(и):  <b>НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ                  ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ,                  вул. Володимирська, 88, м. Київ-33, 01601                  (UA)</b></p>
---	---

### (54) МЕХАТРОННИЙ МОДУЛЬ ПОКРОКОВОГО НАКОПИЧЕННЯ ШАРІВ ВАНТАЖІВ З РЕКУПЕРАТОРОМ ЕНЕРГІЇ

#### (57) Реферат:

Мехатронний модуль покрокового накопичення шарів вантажів з рекуператором енергії включає пневмоциліндр, в корпусі якого встановлено поршень зі штоком, клапан скидання, розподільник та пристрій регулювання тиску. Також встановлений пневмоциліндр двосторонньої дії, поршень якого пов'язаний через направляючу стійку з вантажною платформою, до пневмоциліндра приєднано датчик лінійного переміщення, поєднаний з електронною системою керування, нижня частина пневмоциліндра через моностабільні розподільники та пропорційний регулятор тиску з'єднаний з балоном, датчиком тиску і електронною системою керування, а також через пропорційний регулятор тиску з магістраллю. Електронна система керування має з'єднання з пропорційним регулятором тиску. Клапан скидання встановлено після пропорційного регулятора тиску на шляху до балона, який з'єднано також через зворотний клапан з нижньою частиною пневмоциліндра.



**UA 139490 U**



УКРАЇНА

(19) UA (11) 123968 (13) C2  
(51) МПК  
F15B 11/06 (2006.01)НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ"**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД**

(21) Номер заявки: а 2019 06056	(72) Винахідник(и): Якимчук Владислав Миколайович (UA), Якимчук Микола Володимирович (UA)
(22) Дата подання заявки: 31.05.2019	(73) Володілець (володілці): НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ, вул. Володимирська, 68, м. Київ-33, 01601 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 01.07.2021	(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: UA 117969 C2, 25.10.2018 JP H0979210 A, 25.03.1997 UA 53108 U, 27.09.2010 SU 1325204 A1, 23.07.1987 RU 2439383 C2, 10.01.2012
(41) Публікація відомостей про заяву: 25.09.2020, Бюл.№ 18	
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 30.06.2021, Бюл.№ 26	
<b>(54) МЕХАТРОНИЙ МОДУЛЬ ПОКРОКОВОГО НАКОПИЧЕННЯ ШАРІВ ВАНТАЖІВ З РЕКУПЕРАТОРОМ ЕНЕРГІЇ</b>	

**(57) Реферат:**

Пристрій стосується машинобудування та може використовуватися в різних галузях. Мехатронний модуль покрового накопичення шарів вантажів з рекуператором енергії включає пневмоциліндр, в корпусі якого встановлено поршень зі штоком, клапан скидання, розподільник та пристрій регулювання тиску. Згідно з винаходом встановлений пневмоциліндр двосторонньої

UA 123968 C2



УКРАЇНА

(19) UA (11) 139489 (13) U  
(51) МПК  
F15B 11/06 (2006.01)МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ  
ЕКОНОМІКИ, ТОРГІВЛІ ТА  
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА  
УКРАЇНИ**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

(21) Номер заявки: u 2019 06055	(72) Винахідник(и): Якимчук Владислав Миколайович (UA), Якимчук Микола Володимирович (UA)
(22) Дата подання заявки: 31.05.2019	(73) Власник(и): НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ, вул. Володимирська, 68, м. Київ-33, 01601 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.01.2020	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.01.2020, Бюл.№ 1	
<b>(54) МЕХАТРОНИЙ ПНЕВМАТИЧНИЙ МОДУЛЬ З СИНХРОНІЗАЦІЄЮ ЛІНІЙНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ШТОКІВ В ПРОТИФАЗІ ТА ФУНКЦІЄЮ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ</b>	

**(57) Реферат:**

Мехатронний пневматичний модуль з синхронізацією лінійних переміщень штоків в протифазі та функцією рекуперації енергії включає пневмоциліндр, в корпусі якого встановлено поршень зі штоком, електронну систему керування, регулятор тиску з пропорційним керуванням, датчик тиску, два розподільники з електромагнітними котушками. Додатково встановлено ще один пневмоциліндр, в кожному з них є шток з двома поршнями, розташованими на відстані один від одного, утворюючи поршневу порожнину (А) та дві штокові порожнини (Б та В), поршнева порожнина (А) та штокова порожнина (Б) першого пневмоциліндра пов'язані з поршневою порожниною (А) другого пневмоциліндра, до якої належать датчик тиску, пов'язаний з електронною системою керування, регулятором тиску з пропорційним керуванням та розподільником з електромагнітною котушкою, штокова порожнина (В) першого пневмоциліндра пов'язана з електронною системою керування через розподільник з електромагнітною котушкою та регульованим дроселем зі зворотним клапаном. дві штокові

UA 139489 U



МІНІСТЕРСТВО  
ЕКОНОМІЧНОГО  
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **117262** (13) **U**  
(51) МПК  
F15B 11/06 (2006.01)

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

(21) Номер заявки: <b>u 2016 12907</b>	(72) Винахідник(и): <b>Якимчук Микола Володимирович (UA), Іванова Людмила Іллівна (UA), Горчакова Ольга Миколаївна (UA), Якимчук Владислав Миколайович (UA)</b>
(22) Дата подання заявки: <b>19.12.2016</b>	
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>26.06.2017</b>	(73) Власник(и): <b>НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ, вул. Володимирська, 68, м. Київ-33, 01601 (UA)</b>
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>26.06.2017, Бюл.№ 12</b>	

**(54) МЕХАТРОННИЙ МОДУЛЬ ЛІНІЙНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ З ФУНКЦІЄЮ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ**

**(57) Реферат:**

Мехатронний модуль лінійного переміщення з функцією рекуперації енергії містить пневмоциліндр, в корпусі якого встановлено поршень зі штоком та пневморозподільник. Додатково встановлені регулятор тиску з пропорційним сигналом керування, пов'язаний з ресивером, оснащеним датчиком тиску, встановлений контролер через першу електромагнітну котушку з'єднаний з моностабільним розподільником, а також через другу та третю електромагнітні котушки - з бістабільним розподільником, пневмоциліндр має два датчика положення, які теж пов'язані з контролером, причому перший датчик положення через контролер та третю електромагнітну котушку має зв'язок з бістабільним розподільником, а другий датчик положення через контролер та першу електромагнітну котушку має зв'язок з моностабільним розподільником та ресивером, датчик тиску якого пов'язаний з контролером.

UA 117262 U



МІНІСТЕРСТВО  
ЕКОНОМІЧНОГО  
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **120623** (13) **U**  
(51) МПК (2017.01)  
B01L 9/00  
B65D 35/02 (2006.01)

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

(21) Номер заявки: <b>u 2017 05198</b>	(72) Винахідник(и): <b>Якимчук Микола Володимирович (UA), Іванова Людмила Іллівна (UA), Якимчук Владислав Миколайович (UA)</b>
(22) Дата подання заявки: <b>29.05.2017</b>	
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>10.11.2017</b>	(73) Власник(и): <b>НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ, вул. Володимирська, 68, м. Київ-33, 01601 (UA)</b>
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>10.11.2017, Бюл.№ 21</b>	

**(54) МЕХАТРОННИЙ ЗАХОПЛЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ПЛЯШОК**

**(57) Реферат:**

Мехатронний захоплювальний пристрій для пляшок містить циліндричний пустотілий корпус, упорну гайку, приєднану знизу до нього, та захоплювальний вузол. Корпус в верхній частині має патрубок для подачі стисненого повітря, а всередині до корпуса співвісно з ним за допомогою патрубка приєднаний захоплювальний пристрій у вигляді внутрішнього циліндра, між зовнішньою стінкою якого та внутрішньою стінкою корпуса розміщений поршень, який має у верхній частині ущільнення, внутрішня частина поршня має форму копіра, а дно поршня є упором для пружини, встановленої між упорною гайкою та поршнем. В стінках внутрішнього циліндра закріплені з можливістю рухатись горизонтально затискні елементи, головки яких розташовані між внутрішньою стінкою циліндра та зовнішньою стінкою циліндричного гумового затиску, що розміщений всередині циліндра, на корпусі встановлено датчик тиску з аналоговим виходом.

UA 120623 U



УКРАЇНА

(19) UA (11) 121552 (13) U

(51) МПК (2017.01)

F15B 15/00

G05B 19/43 (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО  
ЕКОНОМІЧНОГО  
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ  
УКРАЇНИ

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

(21) Номер заявки: u 2017 05903	(72) Винахідник(и): Якимчук Микола Володимирович (UA), Іванова Людмила Іллівна (UA), Якимчук Владислав Миколайович (UA)
(22) Дата подання заявки: 13.06.2017	(73) Власник(и): НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ, вул. Володимирська, 68, м. Київ-33, 01601 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 11.12.2017	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 11.12.2017, Бюл.№ 23	

**(54) НЕПОВНОПОВОРОТНИЙ ПНЕВМОДВИГУН З ДЕМПФЕРОМ**

(57) Реферат:

Неповноповоротний пневмодвигун з демпфером містить корпус з кришкою, вал з закріпленою лопаттю. Вал встановлено у верхній частині корпусу, на ньому закріплено лопать з ущільненням, біля зовнішнього краю якого закріплено втулки демпфера, співвісно до осі якої в корпусі з лівої та правої сторін виконано отвори для втулок, навколо яких виконано ущільнення, а знизу в корпусі ці отвори з'єднано з отворами для подачі стисненого повітря, зовні від отворів для втулки виконано вертикальні канали демпфера, а з самого отвору для втулки горизонтальні канали демпфера, які з'єднано з отвором, в якому встановлено гвинт регулювання діаметра каналу демпфера.

UA 121552 U



УКРАЇНА

(19) UA (11) 123561 (13) C2

(51) МПК

F15B 11/06 (2006.01)

F15B 11/22 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ"

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД**

(21) Номер заявки: а 2019 06054	(72) Винахідник(и): Якимчук Владислав Миколайович (UA), Якимчук Микола Володимирович (UA)
(22) Дата подання заявки: 31.05.2019	(73) Володілець (володільці): НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ, вул. Володимирська, 68, м. Київ-33, 01601 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 22.04.2021	(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: UA 117262 U, 26.06.2017 SU 573717 A1, 25.09.1977 SU 603780 A1, 25.04.1978 EP 3064782 A1, 07.09.2016 DE 3047793 A1, 15.07.1982 Приводи та гідропневмоавтоматика: Підручник / О.В.Федорець, М.Н.Педченко, В.Б.Струтинський та ін. За редакцією О.В.Федорця. –К.: Вища школа, 1995. – С.181-192
(41) Публікація відомостей про заявку: 25.09.2020, Бюл.№ 18	
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 21.04.2021, Бюл.№ 16	

**(54) МЕХАТРОНИЙ ПНЕВМАТИЧНИЙ МОДУЛЬ З СИНХРОНІЗАЦІЄЮ ЛІНІЙНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ШТОКІВ В ПРОТИФАЗІ ТА ФУНКЦІЄЮ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ**

UA 123561 C2



МІНІСТЕРСТВО  
ЕКОНОМІЧНОГО  
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **119481** (13) **C2**  
(51) МПК (2019.01)  
B25J 15/00

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД**

<p>(21) Номер заявки: а 2017 05197 (22) Дата подання заявки: 29.05.2017 (24) Дата, з якої є чинними права на винахід: 25.06.2019 (41) Публікація відомостей про заявку: 10.11.2017, Бюл.№ 21 (46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.06.2019, Бюл.№ 12</p>	<p>(72) Винахідник(и): Якимчук Микола Володимирович (UA), Іванова Людмила Іллівна (UA), Якимчук Владислав Миколайович (UA) (73) Власник(и): НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ, вул. Володимирська, 68, м. Київ-33, 01601 (UA) (56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: UA 63969 U, 25.10.2011 UA 32431 U, 12.05.2008 SU 1815222 A1, 15.05.1993 CN 102390053 A, 28.03.2012 US 5029925 A, 09.07.1991 JPH 07132476 A, 23.05.1995</p>
--	---

**(54) МЕХАТРОННИЙ ЗАХОПЛЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ПЛЯШОК**

**(57) Реферат:**

Винахід належить до пристроїв захоплювання промислових роботів та маніпуляторів і може бути використана для створення робототехнічних комплексів обробки затиску крихких, м'яких і тонких деталей, наприклад скляних, пластмасових, крихких тонкостінних, що використовуються у фармацевтичному та мікробіологічному виробництвах.

Мехатронний захоплювальний пристрій для пляшок містить корпус, упорну гайку, приєднану знизу до нього та захований вузол. Згідно з винаходом корпус у верхній частині має патрубок для подачі стисненого повітря, а всередині - до корпуса співвісно до нього за допомогою патрубка приєднаний захоплювальний пристрій у вигляді внутрішнього циліндра, між зовнішньою стінкою якого та внутрішньою стінкою корпуса розміщений поршень, який має у верхній частині ущільнення, внутрішня частина поршня має форму копіра, а дно поршня є упором для пружини, встановленої між упорною гайкою та поршнем, в стінках внутрішнього циліндра закріплені з можливістю рухатись горизонтально затискні елементи, головки яких розташовані між внутрішньою стінкою циліндра та зовнішньою стінкою циліндричного гумового затиску, що розміщений всередині циліндра, датчика тиску з аналоговим сигналом на виході.

Технічний результат - підвищення надійності та чутливості утримання захоплювальних пляшок, можливості захоплення різних типів за розмірами пляшок.

UA 119481 C2