

Харківський національний університет радіоелектроніки

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова

праця на правах рукопису

ВЖЕСНЄВСЬКИЙ МАКСИМ ОЛЕГОВИЧ

УДК 681.5+ 004.942

ДИСЕРТАЦІЯ

«Моделі та методи автоматичного керування транспортувальними засобами-шатлами у складській логістиці»

151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

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

_____ М. О. Вжеснєвський

Науковий керівник

Невлюдов Ігор Шакирович, доктор технічних наук, професор,
Заслужений діяч науки і техніки України, Лауреат Державної премії України
в галузі науки і техніки, Лауреат Державної премії України в галузі освіти

Харків – 2025

АНОТАЦІЯ

Вжеснєвський М. О. Моделі та методи автоматичного керування транспортувальними засобами-шатлами у складській логістиці.– Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, 2025.

Дисертаційна робота є продовженням досліджень, які проводяться на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР) Харківського національного університету радіоелектроніки з питань розробки та впровадження прогресивних інформаційних, ресурсозберігаючих та екологічно-безпечних технологій.

Дисертаційну роботу присвячено актуальній науково-практичній задачі, а саме розробленню моделей та методів автоматичного керування, з урахуванням вимог енергоефективності, автоматичних транспортувальних засобів-шатлів в автоматизованих внутрішньоскладських системах.

Досліджено задачу автоматичного керування рухом транспортувального засоба-шатла в внутрішньоскладських системах в умовах невизначеності, що використовує математичні моделі при виборі параметрів найкращого варіанта рішень керування – для підвищення енергоефективності та продуктивності технологічних систем в межах концепції INDUSTRY 5.0.

На основі електромеханічних аналогій та рівнянь Лагранжа 2-го роду, побудовано моделі процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі для внутрішньо складських вантажних операцій, що дозволило встановити три можливі еквівалентні форми представлення математичних моделей у вигляді системи диференціальних рівнянь першого порядку

відносно кутової швидкості коліс та струму роторів електричних двигунів, у вигляді диференціального рівняння другого порядку відносно кутової швидкості та у вигляді диференціального рівняння відносно струму роторів електричних двигунів. Встановлено закономірності усталених та перехідних процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі в умовах впливів автоматичних регуляторів, у тому числі зі змінними параметрами, для забезпечення інтелектуалізації керування, що відміну від наявних, дозволяє забезпечувати проектування засобів систем автоматизації внутрішньоскладських системах відповідно до концепції INDUSTRY 5.0. Змодельовано технічні засоби автоматизації на основі ПД-регуляторів, за рахунок забезпечення автономності транспортних засобів-шатлів для автоматизації внутрішньоскладських вантажних операцій, шляхом автоматизації керування рухом із точно заданими швидкістю та переміщенням для точного позиціонування, відносно складників логістичної системи, що дало можливість підвищення продуктивності та енергоефективності, стабільності внутрішньо складських вантажних операцій. Запропоновано математичну модель процесу керування переміщенням транспортних засобів-шатлів з використанням ПД-регулятора у формі лінійного диференціального рівняння четвертого порядку із відповідними початковими умовами, амплітудно-частотну характеристику процесу переміщенням з урахуванням резонансних режимів, що на відміну від наявних моделей, дало можливість встановлювати умови та параметри ПД-регуляторів переміщення для уникнення резонансних процесів життєвого циклу експлуатації автоматичних транспортувальних засобів-шатлів. Удосконалено математичну модель керованого технологічного процесу функціонування транспортувального засоба-шатла в автоматизованих внутрішньоскладських системах, що базується на використанні регуляторів із інтелектуальними системами, яка базується на обґрунтуванні поточних параметрів виробничих процесів з використанням комп'ютерно-інтегрованих

технологій, що дозволило забезпечити економію електричної енергії інтелектуальних транспортних засобів-шатлів за рахунок оптимізації швидкості.

Метою дисертаційної роботи є удосконалення систем автоматизації у внутрішньоскладській логістиці, з урахуванням вимог енергоефективності, шляхом розроблення моделей та методів автоматичного керування транспортувальними засобами-шатлами.

Об'єкт дослідження – процес автоматичного керування транспортувальними засобами-шатлами в автоматизованих внутрішньоскладських системах.

Предмет дослідження – математичні моделі та методи, що описують процес автоматичного керування транспортувальними засобами-шатлами.

Методи дослідження. Проведення досліджень ґрунтуються на методах теорії автоматичного керування та аналітичної механіки, які базуються на рівняннях Лагранжа 2-го роду та електромеханічних аналогіях – для математичного моделювання об'єкта автоматизації; методах теорії автоматичного керування, що базуються на використанні передавальних функцій та частотних характеристик – для визначення параметрів автоматичних регуляторів; методах розв'язування задач оптимізації, що базуються на умовах мінімуму функцій однієї змінної – для визначення оптимальних швидкостей руху; методах комп'ютерного моделювання процесів, що реалізовані у вигляді комп'ютерної системи Scilab із відкритим вихідним кодом та вільним розповсюдженням – для дослідження процесів, що відбуваються в об'єктах автоматизації; методи електричних вимірювань щодо експериментальних досліджень – для перевірки моделей, методів та отриманих результатів; метод найменших квадратів – для статистичної обробки результатів вимірювань.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в наступному:

Вперше, шляхом використання електромеханічних аналогій, отримано математичні моделі, що дозволяють виконати розробку систем

автоматичного керування в автоматизованих внутрішньоскладських системах, та, на відміну від існуючих, дає можливість враховувати взаємний вплив механічних та електричних складових транспортувальних засобів-шатлів.

Отримав подальший розвиток метод автоматичного керування рухом транспортувального засоба-шатла, за рахунок використання математичних моделей, який ґрунтується на взаємопов'язаних електромеханічних процесах в системах автоматизації при визначенні параметрів ПД-регуляторів, що дозволяє обирати варіанти керування для забезпечення підвищення енергоефективності та уникнення резонансних явищ в життєвому циклі транспортувального засоба-шатла.

Удосконалено математичну модель автоматичного керування транспортувального засоба-шатла в автоматизованих внутрішньоскладських системах, що базується на використанні ПД-регуляторів з елементами інтелектуалізації та обґрунтуванні параметрів оптимальної швидкості, що дозволило забезпечити енергоефективність логістичних внутрішньоскладських систем.

Набули подальшого розвитку положення для обґрунтування закономірностей усталених та перехідних процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі в умовах впливів автоматичних регуляторів, у тому числі зі змінними параметрами, для забезпечення елементів інтелектуалізації керування, що на відміну від наявних, дозволяє розширити конструкторсько-технологічні рішення при проектуванні систем автоматизації внутрішньоскладських логістичних систем наступного покоління.

Практичне значення результатів роботи. Отримані в роботі методи та математичні моделі процесу керування переміщенням транспортних засобів-шатлів з використанням ПД-регулятора у формі лінійного диференціального рівняння четвертого порядку із відповідними початковими умовами, амплітудно-частотну характеристику процесу переміщенням з

урахуванням резонансних режимів, були впроваджені у навчальний процес кафедри «Інформаційні технології електронних засобів» Національного університету «Запорізька політехніка» при проведенні лекційних та лабораторних занять з дисципліни «Математичні моделі та системний аналіз» (бакалаврат), та «Оптимальні умови автоматичного керування» (магістратура) для спеціальності 174 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (акт від 15.10.2024 р.).

Розроблені математична модель керованого технологічного процесу функціонування транспортувального засоба-шатла в автоматизованих внутрішньоскладських системах, що базується на використанні регуляторів з інтелектуальними системами та базується на обґрунтуванні поточних параметрів виробничих процесів з використанням комп'ютерно-інтегрованих технологій та стенд для дослідних випробувань технічних засобів автоматизації, для інтелектуального керування рухом транспортувального засоба-шатла в внутрішньоскладських системах в умовах невизначеності відповідно до концепції INDUSTRY 5.0. Впроваджено у навчальний процес кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки «Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського» при проведенні лекцій, у методичних вказівках щодо виконання лабораторних та практичних занять з курсів «Технологія електронних пристроїв», «Електронні пристрої кібернетичних систем» для спеціальності 171 – Електроніка (акт від 30.09.2024).

Запропоновані методи та моделі, стенд для дослідних випробувань технічних засобів автоматизації, для інтелектуального керування рухом транспортувального засоба-шатла використовуються в освітньому процесі Харківського національного університету радіоелектроніки на кафедрі КІТАР та студентському конструкторсько-технологічному бюро з «Робототехніки та мехатроніки», зокрема, лекційних, лабораторних та практичних занять з дисциплін «Ідентифікація та моделювання об'єктів автоматизації» та «Проектування систем автоматизації», для здобувачів

першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та «Математичне моделювання процесів та систем» для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані (акт від 23.09.2024).

Результати знайшли практичну реалізацію та впровадження в KAPELOU Europe GmbH (Німеччина), ТОВ «КАПЕЛОУ» (Україна, м. Київ, технічний акт від 4.09.2024 р.) та ТОВ «Омега» (Україна, Харківська область, акт дослідного впровадження від 9.09.2024 р.).

Результати роботи можна віднести до Цілей сталого розвитку: Ціль 8. Гідна праця та економічне зростання та Ціль 9 та «Промисловість, інновації та інфраструктура».

Дисертаційна робота є результатом наукових досліджень автора. Основні наукові результати, які наведені у дисертаційній роботі, отримані здобувачем самостійно досить повно викладені у 17 наукових працях автора за темою дисертації, у тому числі: 1 стаття, що індексується у міжнародній базі Scopus, 5 статей в закордонних фахових виданнях (Польща), 3 наукових фахових видань України (категорії «Б»), 6-ти тезах доповідей, 2 розділах монографії. Праці індексуються в базах Scopus, Index Copernicus, Google Scholar, Research Bible; Index Copernicus (World of Papers), CrossRef, OUCI, ResearchGate, OpenAIRE.

Ключові слова: автоматизація, автоматизоване керування, логістика, транспортування, мікроелектромеханічні системи, мікромеханічні датчики, ідентифікація, оптимізація, моделювання, інтелектуальні системи, виявлення руху, системи підтримки прийняття рішень, мобільний робот, транспортувальний шатл, транспортування, розпізнавання об'єктів, обробка зображень, проблема лінійності, нелінійна система керування, проблема керуваності.

ABSTRACT

Vzhesnievskyi M. O Models and Methods of Automatic Control of Shuttle Vehicles In Warehouse Logistics. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 151 "Automation and computer-integrated technologies" - Kharkiv National University of Radio Electronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, 2025.

The dissertation is a continuation of scientific research of the Department of Computer Integrated Technologies, Automation and Robotics.

(KITAR) of the Kharkiv National University of Radio Electronics on the development and implementation of progressive information, resource-saving and environmentally safe technologies.

The dissertation is devoted to a relevant scientific and practical problem, namely the development of models and methods of automatic control, taking into account the requirements of energy efficiency, of automatic transport vehicleless shuttles in automated intra-warehouse systems.

The problem of the movement automatic control for a shuttle vehicle in intrawarehouse systems under conditions of uncertainty **is investigated**, which uses mathematical models when selecting the parameters of the best control solution – to increase the energy efficiency and productivity of technological systems within the INDUSTRY 5.0 concept.

Based on electromechanical analogies and Lagrange equations of the 2nd kind, models of processes in an automatic shuttle vehicle for intra-warehouse cargo operations are built, which allowed to establish three possible equivalent forms of representation of mathematical models in the form of a system of first-order differential equations with respect to the angular velocity of the wheels and the current of electric motors rotors, in the form of a second-order differential equation

with respect to the angular velocity and in the form of a differential equation with respect to the current of the rotors of electric motors. The regularities of steady-state and transient processes in an automatic shuttle vehicle under the influence of automatic regulators, including those with variable parameters, have been established to ensure intellectualization of control, which, unlike the existing ones, allows for the design of automation systems in intra-warehouse systems in accordance with the INDUSTRY 5.0 concept. The technical means of automation based on PID regulators have been modeled, by ensuring the autonomy of shuttle vehicles for the automation of intra-warehouse cargo operations, by automating movement control with precisely specified speed and movement for precise positioning, relative to the components of the logistics system, which made it possible to increase productivity and energy efficiency, and the stability of intra-warehouse cargo operations. A mathematical model of the movement control process for shuttle vehicles using a PID controller in the form of a linear fourth-order differential equation with appropriate initial conditions, an amplitude-frequency characteristic of the movement process taking into account resonant modes, which, unlike existing models, made it possible to set the conditions and parameters of PID movement controllers to avoid resonant processes in the life cycle of operation of automatic shuttle vehicles. A mathematical model of the controlled technological process of the functioning of a shuttle vehicle in automated intra-warehouse systems was improved, which is based on the use of controllers with intelligent systems, which is based on the justification of the current parameters of production processes using computer-integrated technologies, which made it possible to ensure the saving of electric energy of intelligent shuttle vehicles by optimizing speed.

The **purpose** of the dissertation is to improve automation systems in intrawarehouse logistics, taking into account energy efficiency requirements, by developing models and methods for automatic control of shuttle vehicles.

The **object** of the study is the process of automatic control of shuttle vehicles in automated intra-warehouse systems

The **subject** of the study is a of mathematical models and methods that describe the process of automatic control of shuttle vehicles.

Research methods. The research is based on the methods of the theory of automatic control and analytical mechanics, which are based on Lagrange equations of the 2nd kind and electromechanical analogies – for mathematical modeling of the automation object; methods of the theory of automatic control, which are based on the use of transfer functions and frequency characteristics - for determining the parameters of automatic regulators; methods of solving optimization problems, which are based on the conditions of the minimum of one variable functions – for determining the optimal movement speeds; computer processes modeling methods, which are implemented in the form of the Scilab computer system with open source code and free distribution – for studying the processes occurring in automation objects; methods of electrical measurements in experimental research – for checking models, methods and obtained results; the least squares method - for statistical processing of measurement results.

The scientific novelty of the dissertation work is as follows:

For the first time, by using electromechanical analogies, mathematical models were obtained that allow the development of automatic control systems in automated intra-warehouse systems, and, unlike existing ones, make it possible to take into account the mutual influence of mechanical and electrical components of shuttle transport vehicles.

The method of the movement automatic control for a shuttle transport vehicle was further developed through the use of mathematical models based on interconnected electromechanical processes in automation systems when determining the parameters of PID controllers, which allows choosing control options to ensure increased energy efficiency and avoid resonance phenomena in the life cycle of a shuttle transport vehicle.

The mathematical model of a shuttle vehicle automatic control in automated intra-warehouse systems has been improved, which is based on the use of PID controllers with elements of intellectualization and justification of optimal speed parameters, which allowed to ensure energy efficiency of intra-warehouse logistics systems.

The provisions for substantiating the regularities of steady-state and transient processes in an automatic shuttle vehicle under the influence of automatic regulators, including those with variable parameters, have been further developed to provide elements of intellectualization of control, which, unlike the existing ones, allows expanding design and technological solutions when designing automation systems for next-generation intra-warehouse logistics systems.

Practical significance of the results of the work. The methods and mathematical models of the movement control process for shuttle vehicles using a PID controller in the form of a linear fourth-order differential equation with appropriate initial conditions, the amplitude-frequency characteristic of the movement process taking into account resonant modes, obtained in the work, were implemented in the educational process of the Department of "Information Technologies of Electronic Devices" of the National University "Zaporizhzhia Polytechnic" during lecture and laboratory classes in the discipline "Mathematical Models and System Analysis" (bachelor's degree), and "Optimal Conditions of Automatic Control" (master's degree) for the specialty 174 Automation and Computer-Integrated Technologies (act dated 10/15/2024).

A mathematical model of the controlled technological process of the functioning of a shuttle vehicle in automated intra-warehouse systems has been developed, which is based on the use of regulators with intelligent systems and is based on the justification of the current parameters of production processes using computer-integrated technologies and a stand for experimental testing of technical means of automation, for intelligent control of the movement of a shuttle vehicle in intra-warehouse systems under conditions of uncertainty in accordance with the

INDUSTRY 5.0 concept. It has been introduced into the educational process of the Department of Computer Engineering and Electronics of the Mykhailo Ostrogradskyi Kremenchuk National University during lectures, in methodological instructions for conducting laboratory and practical classes in the courses "Technology of Electronic Devices", "Electronic Devices of Cybernetic Systems" for specialty 171 - Electronics (act dated 09/30/2024).

The proposed methods and models, a stand for experimental testing of technical automation tools, for the movement intelligent control for a shuttle vehicle are used in the educational process of the Kharkiv National University of Radioelectronics at the CITAR Department and the Student Design and Technology Bureau in "Robotics and Mechatronics", in particular, lecture, laboratory and practical classes in the disciplines "Identification and Modeling of Automation Objects" and "Design of Automation Systems", for applicants of the first (bachelor's) level of higher education in the specialty 151 Automation and Computer-Integrated Technologies and "Mathematical Modeling of Processes and Systems" for applicants of the third (educational and scientific) level of higher education in the specialty 151 Automation and Computer-Integrated Technologies (act dated 09/23/2024).

The results have found practical implementation and implementation in KAPELOU Europe GmbH (Germany), KAPELOU LLC (Ukraine, Kyiv, technical act dated 09/04/2024) and Omega LLC (Ukraine, Kharkiv region, act of experimental implementation dated 09/09/2024).

The results of the work can be attributed to the Sustainable Development Goals: Goal 8. Decent work and economic growth and 9 and "Industry, innovation and infrastructure".

The dissertation is the result of the author's scientific research. The main scientific results presented in the dissertation, obtained by the applicant independently, are quite fully set out in 17 scientific works of the author on the topic of the dissertation, including: 1 article indexed in the international Scopus

database, 5 articles in foreign professional publications (Poland), 3 scientific professional publications of Ukraine (category "B"), 6 abstracts of reports, 2 sections of the monograph. The works are indexed in the databases Scopus, Index Copernicus, Google Scholar, Research Bible; Index Copernicus (World of Papers), CrossRef, OUCI, ResearchGate, OpenAIRE.

Keywords: automation, automated control, logistics, transportation, identification, MEMS, micromechanical sensors, optimization, modeling, intelligent systems, motion detecting, decision support systems, mobile robot, transportation shuttle, transportation, object recognition, image processing, linearization problem, linearizability problem, nonlinear control system, controllability problem.

Список публікацій здобувача

1. Automation of Mathematical Modeling of Physical and Technological Processes in the Electronic Devices Manufacture / I. Nevliudov, O. Chala, I. Botsman, O. Klymenko, **M. Vzhesnievskiy** // *Functional Basis of Nanoelectronics : proceedings of the XII International Scientific Conference*, Odessa, September 20-24, 2021. – Odessa, 2021. – P. 74-77 (тези доповіді).

2. Igor Nevliudov, I Nevliudov, A Andrusevich, N Starodubcev, N Demska, **M Vzhesnievskiy** (2021). Evolutions of group management development of mobile robotic platforms in warehousing 4.0. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 4 (18), 57–64. (фахове видання, категорія Б) <https://journals.uran.ua/itssi/article/view/250328>

DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.18.057>

3. Nevlyudov I., Novoselov S., Klymenko O., **Vzhesnievskiy M.** Design and study of gateway operating modes for industrial internet things / *International independent scientific journal* №33/2021 – pp. 75-78. (фах. видання закордон).

4. Аналіз стратегій зберігання виробів в автоматизованому інтелектуальному складі / І. Ш.Невлюдов, В. В. Євсєєв, Н. П. Демська, **М. О. Вжесневський**, О. М. Клименко // *VII Міжнародна науково-практична*

конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка»: Тези доповідей. – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2022. – С. 87-88. (тези доповіді).

5. Nevliudov, I., Andrusevich, A., Starodubcev, N., Demska, N., **Vzhesnievskiy, M.** (2022) Choice of informative attributes for monitoring of the electronic components of automatics lifecycle. Innovative integrated computer systems in strategic project management, : *Collective monograph edited by I. Linde. European University Press. Riga: ISMA*, p. 139-150. (Розділ колективної монографії в країні Євросоюзу)

6. Analysis of Software Products for Simulation Modeling of the Operation of the System of Shuttles for Warehousing /Igor Nevliudov, Vladyslav Yevsieiev, Svitlana Maksymova, Oleksandr Klymenko, Maksym **Vzhesnievskiy** // *Manufacturing & Mechatronic Systems 2022: proceedings of the VIst International Conference*, Kharkiv, October 21-22, 2022. Kharkiv, 2022. - P. 24-26. (тези доповіді).

7. Shuttle-based Storage and Retrieval System 3D Model Improvement and Development / I. Nevliudov, V. Yevsieiev, S. Maksymova, O. Klymenko, **M. Vzhesniewski** // *Journal of Natural Sciences and Technologies*. - 2023. - Vol. 2(2). - P. 232-237. (фах. видання закордон).

8. Igor Nevliudov, Murad Omarov, Yurii Romashov, Vusala Muradova, **Maksym Vzhesnievskiy** One approach to find optimal controls for discrete dynamic systems with numerical methods application // *Advanced Mathematical Models & Applications* Vol.8, No.3, 2023, pp.548-564. (стаття в закордонному виданні, рецензовано в Scopus, кваліфікація Q2).

9. Nevliudov, I., **Vzhesnievskiy, M.**, Romashov, Y. і Chala, O. (2023) «Математичне моделювання мехатронних шатлів як об'єктів автоматизації для багаторівневих систем внутрішньоскладської логістики», *Сучасний стан*

наукових досліджень та технологій в промисловості, (4 (26), с. 135–144. doi: 10.30837/ITSSI.2023.26.135. (фахове видання, категорія Б).

10. Nevliudov Igor, Maksymova Svitlana, Chala Olena, Bronnikov Artem, & **Vzhesnievskyi Maksym**. (2023). Automated Logistics Processes Improvement in Logistics Facilities. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 3(3), 157–170. (фах. видання закордон)

11. Software development for small details production warehouse automated system Nevliudov Ihor , Maksymova Svitlana , Nevliudova Viktoriia , **Vzhesniewski Maksym** , Klymenko Oleksandr. // *Science in the Environment of Rapid Changes: proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference*, Brussels, Scientific Collection «InterConf» February 6-8, 2023. - Brussels, 2023. - P. 320-323.- (фах. видання закордон).

12. Вжеснєвський М. О. Розробка кінематичної схеми транспортувального шатлу для внутрішньоскладської виробничої логістики / **М.О. Вжеснєвський**, О.О. Чала, Ю.В. Ромашов // *матеріали I-ої Всеукраїнської конференції Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки*. – Харків, 2024. – С. 6-10. (тези доповіді).

13. **Вжеснєвський М** Автоматизація внутрішньо-складських виробничих логістичних процесів для впровадження концепції industry 4.0: енергоощадливість, продуктивність, мобільність, модульність, автономність / Вжеснєвський, О. Чала // *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. – Полтава: ПНТУ, 2024. – Т. 2 (76). – С. 34-38. – doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.2.034>. (фахове видання, категорія Б)

14. **Вжеснєвський М.О.** Технічні засоби автоматизації внутрішньоскладських виробничих логістичних процесів // *Матеріали 28-го Міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті»*. Зб. матеріалів форуму. Т. 2. – Харків: ХНУРЕ. 2024. С.: 9-10. DOI: <https://doi.org/10.30837/IYF.ASCTREDB.2024.009> (тези доповіді).

15. Maksymova, S., Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Klymenko, o., & **Vzhesniewski**, M. (2023). Shuttle-Based Storage And Retrieval System 3d Model Improvement And Development. *Journal of Natural Sciences and Technologies*, 2(2), 232–237. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10354730> (фах. видання закордон).

16. Features of Wave Algorithm Application in Warehouse Logistics Transport Systems / I. Nevliudov, **Maksym Vzhesnievskyi**, V. Yevsieiev, S. Maksymova S. et all // *Information systems in project and program managemen* : collective monograph / ed. by I. Linde ; European University Press. – Riga : ISMA, 2023. – P. 251-261 (Розділ колективної монографії в країні Євросоюзу).

17. **М Вжеснєвський** Інтелектуальне керування автономними транспортними шатлами для внутрішньо-складських логістичних систем // *Виробництво & Мехатронні Системи 2024: матеріали VIII-ої Міжнародної конференції*, Харків, 25-26 жовтня 2024 р.: тези доповідей /. Харків: [електронний друк], 2024. С.: 117-119.

ЗМІСТ

	С.
Перелік умовних скорочень.....	22
Вступ.....	23
1. Стан проблеми автоматизації внутрішньо-складських логістичних систем.....	32
1.1 Внутрішньо-складські логістичні системи як об'єкт автоматизації.....	32
1.2 Технічні засоби автоматизації внутрішньо-складських логістичних систем.....	40
1.3 Системи автоматизованого керування внутрішньо-складських логістичних систем та тенденції їх розвитку щодо автоматизації.....	45
1.4 Огляд моделей і методів дослідження електромеханічних процесів в автоматичних транспортувальних засобах-шатлах.....	47
1.5 Висновки за першим розділом.....	49
2 Розроблення математичної моделі електромеханічних процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі для внутрішньо-складської логістики.....	51
2.1 Постановка задач моделювання електромеханічних процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі.....	51
2.1.1 Конструкція автоматичного транспортувального засоба-шатла.....	51
2.1.2 Розрахункова схема автоматичного транспортувального засоба-шатла.....	55
2.2 Математичне моделювання електромеханічних процесів в	

транспортувальному засобі-шатлі.....	60
2.2.1 Методи математичного моделювання електромеханічних процесів.....	60
2.2.2 Математична модель електромеханічних процесів транспортувального засоба-шатла.....	63
2.3 Дослідження математичної моделі електромеханічних процесів транспортувального засоба-шатла.....	71
2.3.1 Дослідження диференціальних рівнянь шляхом зменшення порядку та їх лінеаризації.....	71
2.3.2 Дослідження диференціального рівняння відносної кутової швидкості коліс транспортувального засоба-шатла	73
2.3.3 Дослідження диференціального рівняння електричного струму живлення рушійних електричних двигунів транспортувального засоба-шатла	76
2.4 Дослідження електромеханічних процесів в транспортувальному засобі-шатлі.....	78
2.4.1 Дослідження усталених процесів в транспортувальному засобі-шатлі.....	78
2.4.2 Дослідження перехідних процесів в транспортувальному засобі-шатлі.....	86
2.5 Висновки за другим розділом.....	96
3. Дослідження ПД-регуляторів для автоматичного керування транспортувального засоба-шатла	99
3.1 Автоматичне регулювання швидкості транспортувального засоба-шатла ПД-регулятором.....	99
3.1.1 Математична модель керування швидкістю транспортування вантажів.....	100
3.1.2 Властивості процесів керування швидкістю автоматичного	104

транспортувального засоба-шатла	
3.1.3 Синтез структурної схеми керування транспортувальним засобом-шатлом.....	109
3.1.4 Параметри автоматичних регуляторів керування швидкістю транспортувального засоба-шатла.....	115
3. 2 Розроблення алгоритму роботи системи керування.....	122
3.3 Автоматичне переміщення транспортувального засоба-шатла за допомогою ПД-регулятора.....	126
3.3.1 Математична модель керування переміщеннями вантажів транспортувального засоба-шатла.....	126
3.3.2 Властивості процесів керування переміщення при транспортуванні вантажів автоматичного транспортувального засоба-шатла.....	129
3.3.3 Параметри автоматичних регуляторів керування переміщенням транспортувального засоба-шатла.....	133
3.4 Взаємний вплив ПД-регуляторів швидкості та розташування на керування переміщенням автоматичного транспортувального засоба-шатла.....	139
3.4.1 Лінійне автоматичне керування переміщенням із заданою швидкістю.....	140
3.4.2 Нелінійне автоматичне керування переміщенням із заданою швидкістю	146
3.5 Висновки за третім розділом.....	151
4 Інтелектуалізація керування автоматичним транспортувальним засобом-шатлом.....	154
4.1 Загальні підходи інтелектуалізації керування автоматичним транспортувальним засобом-шатлом.....	154
4.1.1 Узгоджене керування автоматичним транспортувальним	155

засобом-шатлом	
4.1.2 Інтелектуалізація керування автоматичним транспортувальним засобом-шатлом.....	163
4.2 Математичне забезпечення інтелектуалізації керування автоматичними транспортувальними засобами-шатлами.....	167
4.2.1 Обсяги вантажів та швидкості внутрішньо-складського транспортування.....	167
4.2.2 Зменшення енерговитрат автоматичного транспортувального засоба-шатла за рахунок вибору оптимальної швидкості транспортування.....	171
4.3 Перехідні процеси в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі при зміні налаштувань ПІД-регулятора швидкості.....	177
4.3.1 Математична модель перехідних процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі при зміні налаштувань ПІД-регулятора.....	177
4.3.2 Дослідження перехідних процесів при зміні налаштувань ПІД-регулятора в автоматичному транспортувальному засобів-шатлів.....	182
4.4. Висновки за 4 розділом.....	187
5 Експериментальне дослідження електромеханічних процесів в транспортувальному засобі-шатлі на основі комп'ютерного моделювання та натурних випробувань.....	190
5.1 Комп'ютерне моделювання електромеханічних процесів в транспортувальному засобів-шатлів	190
5.1.1 Зведення задачі до системи диференціальних рівнянь першого порядку.....	191
5.1.2 Комп'ютерна модель електромеханічних процесів.....	193
5.2 Оцінка достовірності результатів шляхом натурних	203

випробувань.....	
5.2.1 Планування експерименту натурних випробувань.....	203
5.2.2 Дослідження впливу в'язкого опору на рух еквівалентної електромеханічної системи.....	216
5.2.3 Дослідження ефекту економії електричної енергії за рахунок вибору швидкості руху.....	222
5.3 Висновки за п'ятим розділом.....	227
Перелік джерел посилання.....	231
Висновки.....	236
Додаток А Комп'ютерна модель процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі та програмний сценарій її тестування.....	253
Додаток Б Програма-сценарій обробки результатів вимірювань при проведенні натурального експерименту.....	259
Додаток В Програмне забезпечення для обробки результатів вимірювань	261
Додаток Ж Акти впровадження.....	282
Додаток И Перелік опублікованих праць за темою роботи.....	288

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

Дв – двигун;

ДПМ – датчик поточного місцезнаходження;

ДШ – датчик швидкості.

ЕС – електромеханічна система;

КІТАР – кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки;

МАС – мультиагентні системи ;

МЕМС (MEMS) – мікроелектромеханічні системи;

МК – мікроконтролер керуючий

МК – мікроконтролер;

ММ – математична модель;

НДР – держбюджетна науково-дослідна робота;

ОУ – об'єкт управління.

П – підсилювач;

ПІДЗ – пропорційно-інтегрально-диференціальний закон регулювання;

Р – редуктор;

РЕД – рушійний електричний двигун;

УЗ – узагальнені координати.

ВСТУП

Актуальність теми дослідження.

Бурхливий розвиток автоматизації, робототехніки, мехатроніки дав поштовх до розвитку багатьох галузей промисловості, сільського господарства, торкнувся практично усіх сфер людського життя, не тільки в Україні, а і у світі в цілому [1-3].

Нині, наша країна перебуває на етапі проходження періоду переходу від автоматизованого виробництва до автоматичного, що змінюється через призму концепції та положень Industry 5.0 – нової промислової революції у виробництві.

Не виключенням стала сфера логістики: автоматизація внутрішньоскладських систем переміщення, транспортування на складах.

Однією з важливих тенденцій розвитку у сфері автоматизації внутрішньо-складської логістики є перехід від механізованих, чи частково автоматизованих транспортних засобів до автоматичних та інтелектуально-керованих. Неодмінною складовою, в цьому процесі є продуктивність, енергоефективність функціонування транспортувального засоба-шатла в автоматизованих внутрішньоскладських системах, що може бути досягнута шляхом інтелектуального керування.

Розробки в цьому напрямку ведуться багатьма світовими компаніями, такими як XPO Logistics (працює у тридцяти державах), Nippon Express (Японія), DB Schenker, Keuhne + Nagel (Німеччина) та DHL, що є світовим лідером у галузі логістики і спеціалізується на міжнародних перевезеннях, наданні кур'єрських і транспортних послуг [1, 4].

В межах останньої компанії працевлаштовані до 390 000 працівників і щороку доставляє до 1,5 мільярда посилок по усьому світі, нарощуючи свої потужності та об'єми.

В Україні, також, логістичні процеси є невіддільним складником сектору, що є рушієм в економічних процесах в економіці, сільському господарстві та виробництві [5-10].

Не дивлячись ні на що, в Україні працюють та розширюються такі компанії, що надають логістичні послуги: «Нова Пошта» [11] – перевізник, що постійно розширюється в межах країни та закордоном; група компаній «KARPELOU» – виробник роботизованого обладнання та постачальник комплексних рішень для автоматизації складів [12]; «SBRobotics» – спеціалізується на розробці та впровадженні передових робототехнічних рішень, трансформує виробничі логістичні процеси та покращує ефективність компаній за допомогою автоматизації та інтелектуалізації [13]; «Sklad Service» – це компанія, що реалізує обладнання для автоматизації складу, технології, методи і системи, які дозволяють управляти і покращувати роботу складу за допомогою різних автоматизованих систем [14].

Однак, не зважаючи на досить велику кількість досліджень, що прив'язані до тематики, залишаються не розв'язаними протиріччя між необхідністю знаходження перспективних шляхів розширення номенклатури транспортних засобів для внутрішньоскладських логістичних процесів та подальшим підвищенням їх продуктивності та енергоефективності в автоматизованих внутрішньоскладських системах та знаходженні шляхів їх інтелектуалізації та роботи в умовах невизначеності.

Все це свідчить про те, що розроблення моделей та методів для інтелектуального керування транспортувальними засобами-шатлами, а також удосконалення методів підвищення їх продуктивності та енергоефективності на етапах розробки та проєктування є своєчасним та актуальним науково-прикладним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.
Робота виконана в період з 2021 по 2025 р. на кафедрі комп'ютерно-

інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР) Харківського національного університету радіоелектроніки відповідно наукового напрямку університету та кафедри.

У рамках ініціативної науково-дослідної роботи здобувач приймав участь в держбюджетній науково-дослідній роботі (НДР) (ДР № 0121U109909) «Інтелектуальна багатоцільова робототехнічна платформа з удосконаленими маніпуляційними можливостями» на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР) Харківського національного університету радіоелектроніки.

Результати роботи можна віднести до Цілей сталого розвитку: Ціль 8. Гідна праця та економічне зростання та Ціль 9 та «Промисловість, інновації та інфраструктура».

Метою дисертаційної роботи є удосконалення систем автоматизації у внутрішньоскладській логістиці, з урахуванням вимог енергоефективності, шляхом розроблення моделей та методів автоматичного керування транспортувальними засобами-шатлами.

Для досягнення цієї мети поставлено такі задачі:

- розглянути стан проблеми автоматизації внутрішньо-складських логістичних систем та технічних засобів;
- провести схематизація автоматичного транспортувального засоба-шатла;
- проаналізувати та дослідити математичні моделі процесів в транспортувальному засобі-шатлі;
- провести розділення диференціальних рівнянь шляхом зменшення порядку та їх лінеаризацію;
- провести дослідження усталених та перехідних процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі;
- провести дослідження автоматичного регулювання швидкості транспортувального засоба-шатла ПІД-регулятором;

- провести розробку математичних моделей керування швидкістю та переміщення транспортування вантажів;
- провести розробку моделей лінійного та нелінійного автоматичного керування переміщенням із заданою швидкістю;
- провести розробку моделей для інтелектуалізації системи, щодо прийняття рішень керування в умовах невизначеності автоматичним транспортувальним засобом-шатлом;
- провести розробку математичного забезпечення систем інтелектуального керування автоматичними транспортувальними засобами-шатлами;
- здійснити розробку моделей та методів для зменшення енерговитрат автоматичного транспортувального засоба-шатла шляхом вибору оптимальної швидкості транспортування;
- провести розробку та дослідження математичної моделі перехідних процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі при зміні налаштувань ПД-регулятора;
- провести експериментальні дослідження процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі на основі комп'ютерного моделювання та натурних випробувань;
- розробити комп'ютерні моделі для дослідження усталених та перехідних процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі;
- провести оцінку достовірності результатів шляхом натурних випробувань;
- провести апробацію розроблених моделей для інтелектуального керування автоматичними транспортувальними засобами-шатлами, їх експериментальне дослідження та розробити практичні рекомендації щодо забезпечення підвищення продуктивності та енергоефективності функціонування транспортувального засоба-шатла в автоматизованих внутрішньоскладських системах.

Об'єкт дослідження – процес автоматичного керування транспортувальними засобами-шатлами в автоматизованих внутрішньоскладських системах

Предмет дослідження – математичні моделі та методи, що описують процес автоматичного керування транспортувальними засобами-шатлами.

Методи дослідження. В роботі застосовуються методи аналітичної механіки, які базуються на рівняннях Лагранжа 2-го роду та електромеханічних аналогіях – для математичного моделювання об'єкта автоматизації; методах теорії автоматичного керування, що базуються на використанні передаточних функцій та частотних характеристик – для визначення параметрів автоматичних регуляторів; методах розв'язування задач оптимізації, що базуються на умовах мінімумів функцій однієї змінної – для побудови оптимальних керувань; методах комп'ютерного моделювання процесів, що реалізовані у вигляді комп'ютерної системи Scilab із відкритим вихідним кодом та вільним розповсюдженням – для дослідження процесів, що відбуваються в об'єктах автоматизації; методи електричних вимірювань щодо експериментальних досліджень – для перевірки теоретичних положень та отриманих результатів; метод найменших квадратів – для статистичної обробки результатів вимірювань.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в наступному:

Вперше, шляхом використання електромеханічних аналогій, отримано математичні моделі, що дозволяють виконати розробку систем автоматичного керування в автоматизованих внутрішньоскладських системах, та, на відміну від існуючих, дає можливість враховувати взаємний вплив механічних та електричних складових транспортувальних засобів-шатлів.

Отримав подальший розвиток метод автоматичного керування рухом транспортувального засоба-шатла, за рахунок використання математичних моделей, який ґрунтується на взаємопов'язаних електромеханічних процесах

в системах автоматизації при визначенні параметрів ПД-регуляторів, що дозволяє обирати варіанти керування для забезпечення підвищення енергоефективності та уникнення резонансних явищ в життєвому циклі транспортувального засоба-шатла.

Удосконалено математичну модель автоматичного керування транспортувального засоба-шатла в автоматизованих внутрішньоскладських системах, що базується на використанні ПД-регуляторів з елементами інтелектуалізації та обґрунтуванні параметрів оптимальної швидкості, що дозволило забезпечити енергоефективність логістичних внутрішньоскладських систем.

Набули подальшого розвитку положення обґрунтування закономірностей усталених та перехідних процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі в умовах впливів автоматичних регуляторів, у тому числі зі змінними параметрами, для забезпечення елементів інтелектуалізації керування, що на відміну від наявних, дозволяє розширити технологічні процедури проектування систем автоматизації внутрішньоскладських логістичних систем наступного покоління.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові і практичні результати отримані автором особисто. У роботах (статтях), опублікованих зі співавторами, здобувачеві належать (Додаток И):

Всі наукові і практичні результати отримані автором особисто. У роботах (статтях), опублікованих зі співавторами, здобувачеві належать:

[2] – удосконалення конструкції мобільної роботизованої платформи, що основою для розробки нового автоматичного інтелектуалізованого метода завантаження та розвантаження, підвищення щільності зберігання продукції на складах;

[3] – моделювання конфігурації режимів роботи шлюзів IoT, що можуть бути використані у складській логістиці;

[5] – розробка методу вибору ознак для моніторингу життєвого циклу автоматичних систем;

[7] – розробка методу переміщення автоматичного транспортувального засобу шатла в паралельно-перпендикулярній площині складського приміщення;

[8] – з використанням рівнянь Лагранжа 2-го роду та електромеханічних аналогій побудував диференціальні рівняння математичної моделі електромеханічної колісної платформи та розробив відповідну цим рівнянням комп'ютерну модель в графічному середовищі моделювання Xcos комп'ютерної системи Scilab.;

[9] – розробка математичної моделі транспортувального шатла як об'єкта автоматизації та отримання передавальної функції автономної шатлової системи для автоматичного регулювання її швидкості;

[10] – розробка програмного забезпечення для автоматизованої системи логістичних процесів на складах;

[11] – розробка спеціалізованого програмного забезпечення для автоматизації складської системи;

[13] – обґрунтування вибору критеріїв модернізації для підвищення ефективності виробничої внутрішньоскладської логістики;

[15] – розробка конструктивних рішень шатлових транспортувальних систем для збільшення продуктивності складської логістики;

[16] – розробка та проведення експериментальних досліджень з імітації руху засобу шатла.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи було апробовано на конференціях та висвітлено тезами доповідей:

– Automation of Mathematical Modeling of Physical and Technological Processes in the Electronic Devices Manufacture / I. Nevliudov, O. Chala, I. Botsman, Oleksandr Klymenko, **Maksym Vzhesnievskiy**. // Functional Basis of

Nanoelectronics : proceedings of the XII International Scientific Conference, Odessa, September 20-24, 2021. – Odessa, 2021. – P. 74-77;

– Аналіз стратегій зберігання виробів в автоматизованому інтелектуальному складі / І. Ш.Невлюдов, В. В. Євсєєв, Н. П. Демська, **М. О. Вжесневський**, О. М. Клименко // VII Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка»: Тези доповідей. – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2022. – С. 87-88;

– Analysis of Software Products for Simulation Modeling of the Operation of the System of Shuttles for Warehousing /Igor Nevludov, Vladyslav Yevsieiev, Svitlana Maksymova, Oleksandr Klymenko, Maksym **Vzhesnievskiy** // Manufacturing & Mechatronic Systems 2022 : proceedings of the VIst International Conference, Kharkiv, October 21-22, 2022 .: Kharkiv : [electronic version], 2022. - P. 24-26.;

– Вжесневський М. О. Розробка кінематичної схеми транспортувального шатлу для внутрішньоскладської виробничої логістики / **М. О. Вжесневський**, О. О. Чала, Ю. В. Ромашов // матеріали І-ої Всеукраїнської конференції Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки. – Харків, 2024. – С. 6-10.;

– **Вжесневський М.О.** Технічні засоби автоматизації внутрішньоскладських виробничих логістичних процесів // Матеріали 28-го Міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 2. – Харків: ХНУРЕ. 2024. –С.: 9-10. DOI: <https://doi.org/10.30837/IYF.ASCTREDB.2024.009> .

– **М. Вжесневський** Інтелектуальне керування автономними транспортними шатлами для внутрішньо-складських логістичних систем // Виробництво & Мехатронні Системи 2024: матеріали VIII-ої Міжнародної конференції, Харків, 25-26 жовтня 2024 р.: тези доповідей /. Харків: [електронний друк], 2024. С.: 117-119.

Публікації. Матеріали дисертації досить повно викладено у 17 наукових працях автора за темою дисертації, у тому числі: 1 стаття, що індексується у міжнародній базі Scopus, 5 статей в закордонних фахових виданнях (Польща), 3 наукових фахових видань України (категорії «Б»), 6 тезах доповідей, 2 розділах монографії.

Праці індексуються в базах Scopus, Index Copernicus, Google Scholar, Research Bible; Index Copernicus (World of Papers), CrossRef, OUCI, ResearchGate, OpenAIRE.

Структура та обсяг дисертації роботи. Дисертаційна робота містить: вступ, п'ять розділів, висновки, список використаної літератури та шість додатків.

Повний обсяг дисертації становить 291 сторінка тексту (з них 214 сторінок основного тексту), містить 36 рисунків, 6 таблиць, список використаних джерел із 121 найменування (на 17 сторінках), 4 додатки (на 39 сторінках), аноацію (15 сторінок).

1 СТАН ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВНУТРІШНЬО-СКЛАДСЬКИХ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ

1.1 Внутрішньо-складські логістичні системи як об'єкт автоматизації

Динамічні процеси в світовій економіці сприяли зростанню ролі логістики як дієвого інструменту підвищення ефективності та конкурентоспроможності підприємств на ринках товарів і послуг, а також привели до формування міжнародних транспортних коридорів, глобальних і регіональних мереж постачання, потужних логістичних кластерів та альянсів [1].

Ще у 2019 році обсяги логістичних послуг становив 6,6 трлн. дол. США, у тому числі близько 1 трлн. дол. США – обсяг комплексних логістичних послуг.

Розвиток та затребуваність логістичних послуг, відбувається і в Україні. Логістика має все більший вплив на формування структури національної економіки, визначаючи її профіль, що проявляється у зростанні внеску логістичних послуг у структуру загальнонаціонального бюджету, кількість зайнятих працівників в логістичних процесах взаємодії і залученні значних інвестиційних коштів у розвиток транспортно-логістичної інфраструктури.

Серед різноманіття видів логістичних послуг особлива роль належить складським послугам, оскільки переміщення товарних потоків в логістичних ланцюгах, мережах, каналах неможливе без концентрації і зберігання необхідних обсягів запасів товарно-матеріальних цінностей на різного роду складах.

Склади як ключова ланка ланцюгів постачання забезпечують синхронізацію попиту і пропозицію та доступність товарів для споживачів.

З іншого боку, на складах створюється значна частка доданої вартості товарів і послуг. Усі складські операції мають прямий вплив на збільшення вартості товарів для кінцевих споживачів [15-17].

Складська логістика – це вид логістики, що керує комплексом взаємопов'язаних операцій, які забезпечують рух матеріальних і супутніх потоків в процесі приймання, розміщення, зберігання, обліку товарів і організації продажу споживачам при мінімальних витратах на організацію складського господарства, розрахунок оптимальної кількості складів та місця їх розташування [18].

Склад є одним із ключових елементів логістичного менеджменту, важливість якого не обмежується стінами спеціалізованої будівлі для зберігання продукції, оскільки ефективне управління складським комплексом відіграє важливу роль для планування та функціонування ланцюга постачання.

Управління складським комплексом є частиною системи управління логістикою, і відповідно ланкою ланцюга поставок. Неможливо розглядати склад лише як місце для зберігання готової продукції та виконання функцій обробки вхідного та вихідного товаропотоку, оскільки ефективне управління цим комплексом має потенціал створення вагомих економічних переваги як для бізнесу, так і для його клієнтів [8, 19-21].

Внутрішньо логістичні виробничі процеси є досить складними, вимагають чіткої узгодженості та урегульованості, вміщують в своїй суті процеси постачання, переробки і розподілу, контролю, розвантаження і приймання вантажів; внутрішньо складське транспортування та перевалку; складування і зберігання; комплектацію та відвантаження; експедирування; збирання та доставку порожніх товароносіїв; контроль та інформаційне комп'ютерно-інтегроване обслуговування.

В залежності від характеру виконуваних функцій, склади поділяються на сортувально-розподільчі, транзитно-перевалочні та накопичувальні.

Від типу складу залежить і технічні засоби автоматизації, які доцільно використовувати на складах.

Незалежно від спрямованості технічної оснащення переробки вантажу обробка інформаційних потоків має бути автоматизованою та інтелектуалізовано [21-22].

Оптимальна система складування на виробництві передбачає раціональність технологічного процесу на складі. Основною умовою тут є мінімальна кількість операцій з переробки вантажу, енергоощадливість, модульність технічних засобів автоматизації та робототехніки.

Саме тому, важливо визначити оптимальний вид і розмір товароносіїв, на якому формується складська вантажна одиниця. Такими товароносіями можуть стати: стоїчні, сітчасті, ящичні, пласкі піддони та напівпіддони, а також касети, ящики для дрібних вантажів та правильно підібрані технічні засоби автоматизації – підйимально-транспортне обладнання, для автоматизації складських виробничих систем.

Впоратися з цими завданнями та забезпечити безперебійну роботу складу 24/7 навіть в екстремальних умовах може автоматизація складу та сучасні технології відбору товару в середині самих зон складу [23].

Цілями автоматизації в сучасних реаліях є збільшення продуктивності, оптимізація витрат, зменшення навантаження на складських працівників, ощадливе використання електроенергії.

При цьому, важливим критерієм є швидкість реалізації проєкту на основі модульності обладнання.

Однією з основних умов, що забезпечує високі темпи зростання продуктивності праці в промисловості, є постійне вдосконалення парку обладнання, технічних засобів автоматизації та впровадження роботизованих систем. Це досягається насамперед заміною застарілого обладнання новим, сучасним [24].

Провівши аналіз ринку України та Європи було виділено ряд повідних компаній, що займаються складською логістикою та автоматизацією складських ресурсів, було виділено ряд лідерів, які застосовують інноваційні перспективні підходи та методи.

Актуальність поведених досліджень визначається необхідністю забезпечення підвищення ефективності чинного парку обладнання, з невеликими витратами і швидкою окупністю для вирішені ряду питань виробничої внутрішньоскладської логістики.

Метою дисертаційної роботи є удосконалення систем автоматизації у внутрішньоскладській логістиці, з урахуванням вимог енергоефективності, шляхом розроблення моделей та методів автоматичного керування транспортувальними засобами-шатлами.

Фокус удосконалення та дослідження повинен спиратися на процеси модернізації в виробничих внутрішньоскладських автоматизованих системах на основі концепції кіберфізичних підходів INDUSTRY 5.0, шляхом підвищення їх продуктивності за критеріями енергоощадливості та мобільності, автономності та модульності.

Якщо говорити про позитивні зрушення в українській логістиці, можна сказати про такі тенденції:

- 1) складська інфраструктура поступово розгалужується, відновлюється, будуються нові склади, що є полем для нових інноваційних рішень;
- 2) спостерігається попит на складські приміщення невеликого розміру. Це так звані логістичні хаби, що використовуються для накопичення продукції;
- 3) логістичні провайдери впроваджують нові послуги та рішення для своїх клієнтів, з використанням нового комп'ютерно-інтегрованого підходу та автоматизації процесів усіх рівнів;

4) також відома як сталий розвиток логістики, зелена логістика охоплює комплекс політик і заходів, спрямованих на зменшення впливу бізнес-діяльності на навколишнє середовище.

Свідомість про екологічні питання набуває все більшого значення, оскільки компанії прагнуть зменшити викиди вуглецю, забруднення та відходи на всіх етапах ланцюга поставок [1].

Використання електромобілів, підтримка пунктів забору та використання біорозкладних матеріалів – це лише деякі з заходів, які компанії впроваджують для обмеження відходів та зменшення споживання енергії під час своїх бізнес-процесів.

Звичайно, на українську логістичну галузь впливають і виклики – переформатування транспортної та складської інфраструктури, покращення мобільності та відновлення бізнес-процесів [3].

Для аналізу було використано «Портал відкритих даних від Міністерства цифрової трансформації України» [5].

З поведеного дослідження випливає, що логістичні компанії підвищують свій капітал та розвиваються.

Провівши аналіз було виділено ряд компаній, які займаються автоматизацією логістики прослідковано тенденції розвитку.

Основними завданнями, що перед собою ставить група компаній «КАPELOU», виробник роботизованого обладнання та постачальник комплексних рішень для складу є [12]:

- оптимізація витрати, шляхом збільшення корисної площі на складі;
- зменшення навантаження на персонал;
- скорочення тривалості обробки товарів, застосовуючи ефективні технології відбору;
- спрощення контролю зібраних ящиків після відбору замовлень;
- забезпечення швидкості реалізації проєктів за допомогою модульності обладнання;

- зниження споживання електроенергії на складі;
- встановлення обладнання, яке в разі потреби можна швидко релакувати та використовувати на іншому складі, що забезпечується модульністю конструкцій.

Необхідно також виділити компанію «SBRobotics» [13]. Це передова в Україні організація, яка спеціалізується на розробці та впровадженні передових робототехнічних рішень.

Основними завданнями, що ставить перед собою компанія, є трансформувати виробничі логістичні процеси та покращення ефективності компаній за допомогою автоматизації та інтелектуалізації.

В першу чергу «SBRobotics» прагне надати клієнтам передові та інноваційні рішення, які дозволяють їм мати конкурентну перевагу на ринку.

«SBRobotics» має широкий спектр робототехнічних рішень, включаючи автоматизацію процесів, роботи зі штучним інтелектом, розробку роботів для конкретних завдань та багато іншого.

Основні напрямки роботи:

- інтеграція та сумісність: розробка робототехнічних рішень з урахуванням сумісності та легкої інтеграції з наявною інфраструктурою та системами клієнтів;
- навчання та підтримка: надається широкий спектр навчальних програм та підтримки для клієнтів, щоб їхній персонал отримав необхідні навички та знання для ефективної роботи з нашими робото-технічними рішеннями;
- безпека та регуляторні питання: питання безпеки та відповідності регуляторним вимогам, дотримання стандартів безпеки та рішень, які відповідають найвищим нормам і вимогам.

Кампанія вбачає перспективу у використанні передових технологій на основі нововведень належать в роботизації, за рахунок використання роклаштабелер – підіймально-транспортних пристроїв, створений для

переміщення вантажів у приміщенні складу; універсальних платформа, що використовуються для обробки різних вантажів; сортувальників, які є ключовим елементом автоматизованої системи, метою якого є точний розподіл вантажів за відповідними місцями.

Аналізуючи ринок виробників обладнання для автоматизації логістики, необхідно виділити також «Sklad Service» [14] – це компанія, що реалізує обладнання для автоматизації складу – це набір технологій, методів і систем, які дозволяють управляти і покращувати роботу складу за допомогою різних автоматизованих систем, таких як стелажні системи, конвеєри, вантажну техніку, автоматизовані системи зберігання, підйомні столи, пластикову тару, сміттєві контейнери.

Компанія вирішує комплекс завдань: впроваджувати функціональні ідеї, ефективно використовуючи площу замовника. Пропонує варіанти і комбінації, щоб в результаті вийшов максимально опрацьований проект по заданих параметрах і бюджету.

Аналізуючи різноманіття ринку, на якому представлено достатня кількість компаній, що займається автоматизацією логістики, можна зробити висновки, що ця сфера є затребуваною, перспективною та має «запас» для розвитку.

Підсумовуючи, можна зробити висновок, що автоматизація складів у сучасних умовах ставить перед собою питання для вирішення, що базуються на енергоощадливості, продуктивності, мобільності та модульності.

Для реалізації цих поставлених завдань, необхідно вирішити завдання, що лежать в концепціях автоматизації логістики, з використанням кіберфізичних підходів Industry 4.0, і є важливим інструментом для підвищення продуктивності роботи логістичних операторів на основі використання технологій комп'ютерного програмного забезпечення, робототехніки чи робо-машин [25].

Існує багато різних технологій, пов'язаних з автоматизацією в логістиці. Постійно розробляється нове обладнання та програмне забезпечення. Досліджено основні тренди такі як автоматизація та діджиталізація логістичних процесів, зокрема, автоматизації складських комплексів чи їх складників час-тин з використанням кіберфізичних підходів Industry 4.0 [26].

Таким чином, основним об'єктом логістики є матеріальні потоки та способи реалізації їх переміщення [27].

Використання багаторівневих шатлових систем частково вирішує проблему транспортування та зберігання великих об'ємів продукції на складах [28-29]. Але значним недоліком відзначити високу вартість шатлових конструкцій та їх монтажу, обслуговування та невисоку енергоефективність [25-26].

Концепція Industry 4.0 включає використання автоматичних мобільних робототехнічних платформ (Shuttle), або автоматизованих навантажувачів, що переміщуються вздовж або всередині стелажної системи, здійснюють пошук, переміщення та видачу виробів залежно від заявок, що надійшли. Їх застосування дозволяє знизити операційні витрати та оптимізувати управління ланцюжками постачання й доступ до ресурсів, за рахунок більш ефективного управління запасами [30].

Одним із важливих компонентів, на яких базуються сучасні Warehouse Management Systems (WMS), в рамках Industry 4.0, є впровадження таких технологій:

- Mobile Autonomous Rack System – системи стелажів, що встановлюються в систему рейкових напрямних, так що полиці можуть переміщатися вперед і назад вздовж рейок [31];

- Autonomous Vehicle Storage and Retrieval System (AS/RS) – використання автоматизованих керованих підйомно-транспортних пристроїв, які доставляють вироби на склад і витягують їх звідти у разі потреби;

– Compact Storage and Retrieval System – автоматизовані системи, які ефективно та безпечно зберігають вироби компактних розмірів;

– Collaborative Robot System – система автоматичного групового управління мобільними роботизованими платформами, яка взаємодіє з оператором, з метою спільного використання робочого простору для вирішення завдань зберігання, навантаження, відвантаження виробів [17].

На даний момент часу існують стратегії зберігання виробів у системах WMS.

Варто зауважити, що кожна з проаналізованих стратегій, має певну мету для досягнення економічного ефекту у вигляді досягнення певних вимог [18].

Всі вони переслідують мету оптимізації визначених параметрів складування, при цьому є можливість знехтувати іншими. Це, відповідно, не дозволяє виділити якусь універсальну стратегію зберігання виробів.

1.2 Технічні засоби автоматизації внутрішньо-складських логістичних систем

За рівнем автоматизації внутрішньо-логістичні системи можна умовно розділити на:

– не механізовані – це склади, на яких основні операції переміщення і складування вантажів здійснюється вручну чи з застосуванням засобів малої механізації (ручні візки, ручні візки з гідроприводом підйому і т.п.);

– механізовані – це склади, на яких основні операції переміщення і складування вантажів здійснюються з застосуванням засобів механізації з ручним керуванням, а окремі додаткові операції виконуються вручну чи з застосуванням засобів малої механізації;

– комплексно-механізовані (або частково автоматизовані) – це склади, на яких всі операції переміщення і складування вантажів здійснюються застосуванням засобів механізації з ручним керуванням;

– автоматизовані – це комплексно-механізовані склади, на яких окремі операції виконуються машинами і механізмами з напівавтоматичним управлінням, з введенням команд оператора на пульт в діалоговому (інтерактивному) режимі. Для цього використовуються мікроелектромеханічні системи (МЕМС): мікромеханічні датчики. Вони особливо корисні для відстеження руху: включають кілька датчиків, наприклад, гіроскопи, акселерометри та магнітометри для отримання більш точного представлення руху системи [32 - 33].

Автоматизовані склади складаються з накопичувальних підсистем, які обслуговують краном-штабелером багатоярусні одно- або багаторядні стелажні секції, в осередках яких вантажі розміщені в тарі або на піддонах.

Такий склад, як правило, має чотириярусну однорядну стелажну секцію 5 (рис. 1.1).

Кран-штабелер 1 може обслуговувати будь-яку клітинку складу за вказівками від підсистеми управління пульта оператора 9. Кран переміщується вздовж стелажів складу, його каретка може піднятися на будь-який ярус, а телескопічна платформа 3 вантажозахоплювального пристрою висувається в обидві сторони, обслуговуючи осередок стелажної секції або позиції видачі 8 і завантаження складу 10. Якщо потрібно взяти вантаж з осередку, то телескопічна платформа 3 крана-штабелера опускається трохи нижче днища тари 2 або піддону.

Платформа піднімає вантаж, витягує його з осередку і кран-штабелер транспортує вантаж до позиції 8 видачі зі складу. Для здачі вантажу платформа опускається трохи вниз. Тара (або піддон) ніжками спирається на стелажну конструкцію осередку складу або позиції видачі і платформа вільно виходить з-під днища.

Розміщення піддонів з вантажем може здійснюватися по заздалегідь закріпленим осередкам (статична модель функціонування складу), або у вільний найближчий осередок (динамічна модель функціонування складу) і фіксується у пам'яті системи управління. Управління складом здійснюється з пульта оператора 9 за допомогою програмованого контролера, через який у підсистему управління вводять інформацію про вантажні одиниці, що надійшли для завантаження на склад; – автоматичні – це комплексно-механізовані склади, на яких основні технологічні операції переробки і складування вантажів виконуються автоматично, без участі оператора

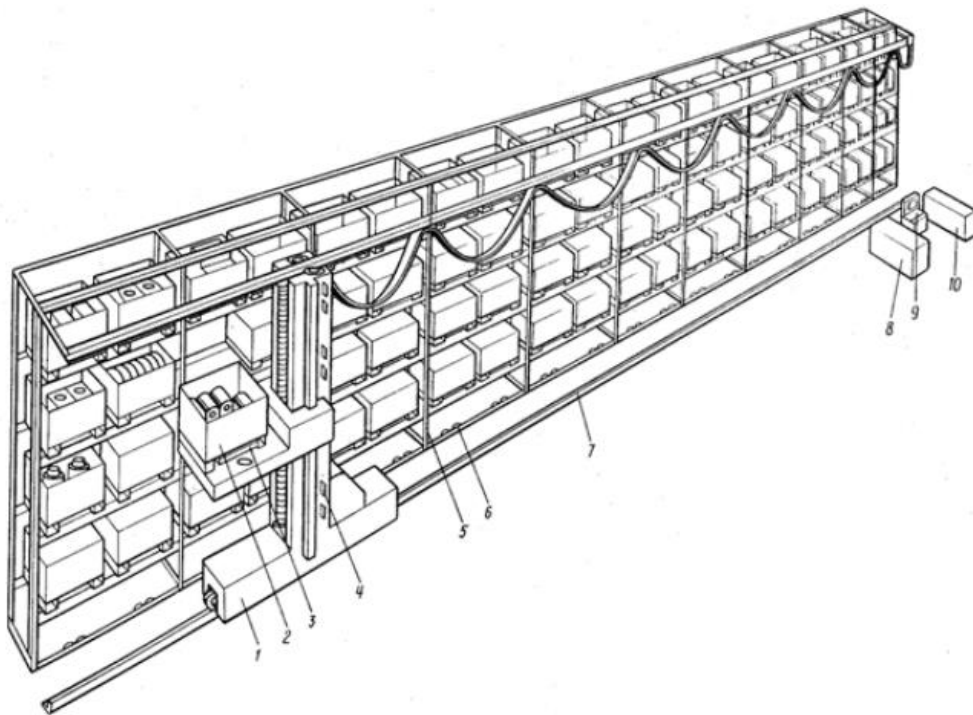


Рисунок 1.1 . – Схема автоматизованого складу [34]

. Подібний «розумний склад» самостійно справляється з низкою завдань, для виконання яких зазвичай потрібно цілий штат співробітників. Автоматичні склади забезпечують безпечне зберігання, здійснюють комплектацію замовлення, в автоматичному режимі вивантаження виробів в потрібній послідовності (рис. 1.2).

Склад складається з автоматичних кранів штабелерів, які переміщують одиниці зберігання між осередками стелажів і зонами навантаження і вивантаження, транспортних систем, і безпосередньо стелажній конструкції і забезпечує високий рівень автоматизації складської логістики, і тому знаходить широке застосування в різних областях [35].

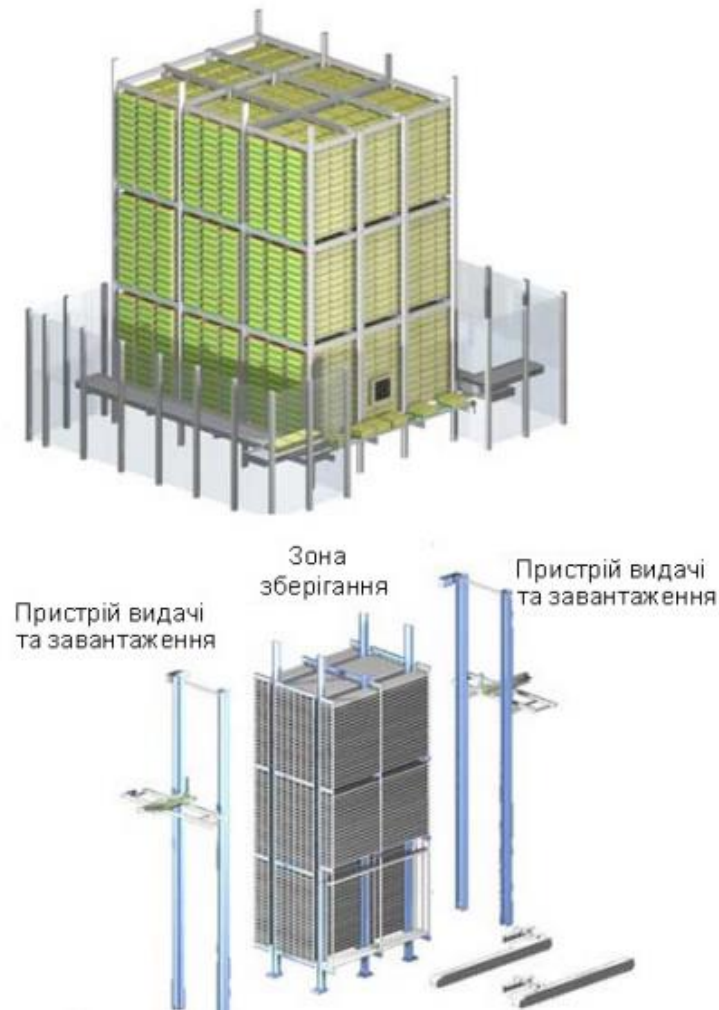


Рисунок. 1.2 – Схема автоматичного складу для зберігання коробок [36]

Для обслуговування внутрішньо-складських логістичних систем найчастіше можуть бути використані різноманітні підйомально-транспортні машин та механізми. Їх вибір залежить від характеристик самих

технологічних засобів і загальної спрямованості технічної оснащення складу [37].

При цьому високий рівень механізації і автоматизації складських робіт, а отже і використання високопродуктивних технічних засобів доцільне на великих складах з великою складською площею та стійким однорідним матеріальним потоком.

На складах, використовуваних для різних роздрібних підприємств, можуть застосовуватися і засоби малої механізації, особливо при комплектації замовлення.

Найбільш поширеними на механізованих складах є такі види підйнятно-транспортних засобів, як електронавантажувачі та електроштабелери, а на автоматизованих складах – між стелажні крани-штабелери [38].

На рис. 1.3 наведено класифікацію технічних засобів автоматизації транспортно-підйомного обладнання, яке використовується у внутрішньо складських виробничих логістичних процесах.

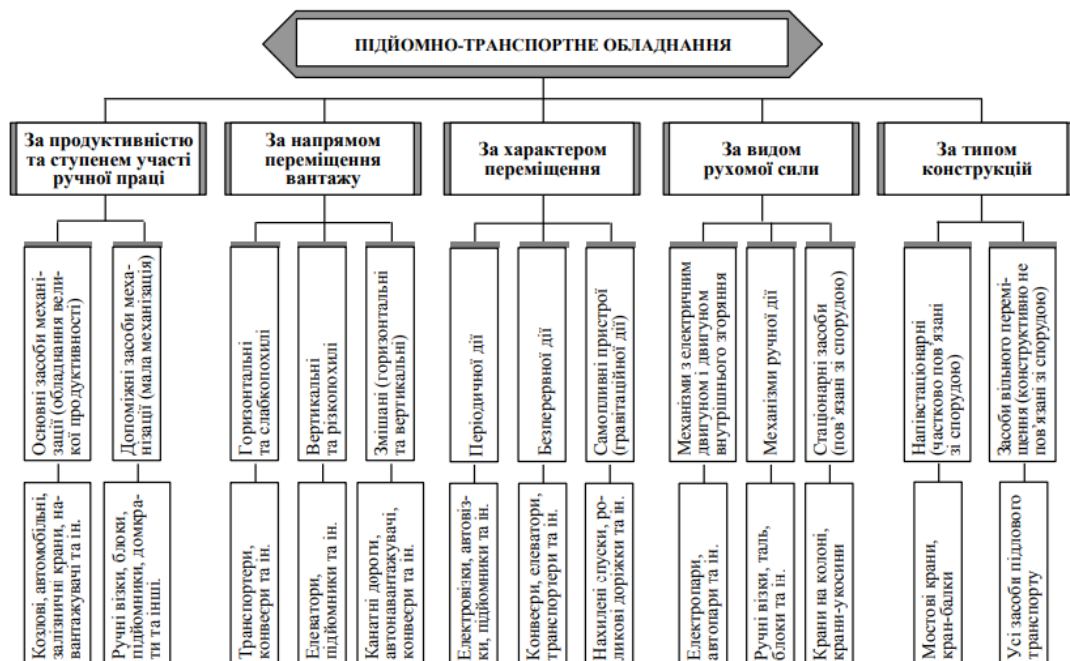


Рисунок 1.3 – Класифікація транспортно-підйомного обладнання [39]

1.3 Системи автоматизованого керування внутрішньо-складських логістичних систем та тенденції їх розвитку щодо автоматизації

На даному етапі розвитку спостерігається перехід від механізованих складів до автоматизованих чи повністю автоматичних.

Цей перехід є складним процесом, що включає в себе як зміну обладнання так програмні рішення на основі і інтелектуальної підтримки прийняття рішень керування внутрішньо-складськими процесами.

Це складна кіберфізична система, яка складається з багатьох складників і яка є мультиагентною [16, 22, 40-42].

Застосування інтелектуальних систем і технологій, базується на імітаційному моделюванні, свідчить про те, що вона є досить актуальною, оскільки є частиною інтелектуальних інформаційних систем, забезпечуючи при цьому гнучкість системи, спрямованої на підвищення ефективності управління, організації та контролю над усіма складовими [43-44].

Слід також враховувати, що складське простір вимагає цілого ряду супутніх витрат, і що більше склад, то більше експлуатаційних витрат із нею пов'язано. Тому має сенс максимально використовувати доступний простір, а це означає не тільки використання всієї площі, а й висоти приміщення.

Сучасним трендом, що може вирішити комплексні завдання мультиагентності в автоматизації складських приміщень є використання шатлових систем для обслуговування виробничих складів та підготовчої зони складу, шляхом впровадження систем автоматизації з елементами інтелектуальної підтримки прийняття рішень їх керування [43].

Перше питання яке необхідно вирішити є питаннями , що пов'язані з переходом від механізованих пристроїв до автоматизованих – це питання оновлення парку технічних засобів автоматизації, шляхом розробки не тільки нових конструкцій, а й інноваційних підходів керування, що базуються на використанні математичних моделей та фізичних процесів.

Традиційно шатли, як правило, реалізуються з волочильними кабелями. З погляду гнучкості й можливості пересування на складі й виробництві це викликає певні проблеми, що можуть бути вирішені за рахунок використання автоматичних шатлів.

До сімейства шатлів належать каналні транспортні засоби й автоматичні розподільні транспортні засоби.

В таких автоматичних транспортувальних шатлах для забезпечення рушійних зусиль найбільш доцільним є використання електроприводів, оскільки вони можуть мати досить невеликі габарити та при цьому не утворюють викидів до навколишнього середовища, як, наприклад, приводи із двигунами внутрішнього згоряння, що насправді є принципово важливим для закритих складських приміщень [45].

Але використання автоматизованих чи автоматичних шатлів викликає проблему саме в курування цими шатлами, що само по собі є наукоємною прикладною складною задачею що включає в себе ряд завдань.

Ці завдання торкаються перегляду парадигми в конструктивному виконанні шатлів, принципах керування та інтелектуалізації, що тягне за собою значні ускладнення математичних моделей для процесів, що зазвичай представляються у вигляді систем лінійних та нелінійних звичайних диференціальних рівнянь із початковими умовами, що в деяких випадках ускладнює розв'язування інженерних питань щодо автоматизації через необхідність використання значною мірою більш удосконалених та іноді, навіть, принципово нових підходів.

В розрізі науково-прикладних завдань повинна бути розглянута комплексно-науково-прикладна низка питань щодо удосконаленого моделювання процесів в транспортувальних засобів-шатлів для забезпечення у подальшому належного врахування їхніх властивостей при розв'язуванні задач щодо автоматизації як перехідних так й усталених режимів, а також автоматичного вибору оптимальних параметрів для усіх режимів роботи

шалів з рахуванням основних критерій, на які в найближчому майбутньому будуть направлені розробки в сфері автоматизації виробничої внутрішньої логістикиж.

До тенденцій розвитку складських автоматизованих ситем можна віднести оснащення засобів-шатлів системами компютерного зору, що використовує метод видалення небажаних компонентів дощу з зображень. Це рекурентна багатоетапна архітектура мережа, на якій в базується метод і дозволяє потенційно застосовувати його для вирішення завдань в умовах обмежених обчислювальних ресурсів. Цей метод може бути успішно використаний при розробці інтелектуальних систем для моніторингу територій за допомогою камер спостереження, автономного керування транспортними засобами, обробки результатів аерофотозйомки тощо. В перспективі слід розглянути можливість формування окремої підмержі для усунення розмитості на зображенні та провести навчання мережі на наборах даних [46].

Тобто, автоматизація та удосконалення шатрових систем в логістиці, шляхом використанням кіберфізичних підходів та мультиагентності, один з найкоротших шляхів підвищення параметрів зменшення часу транспортування, сортування, зберігання та підвищення енергоефективності та гнучкості процесів внутрішньо складської логістики.

1.4 Огляд моделей і методів дослідження електромеханічних процесів в автоматичних транспортувальних засобах-шатлах

Електромеханічні процеси у загальному сенсі розуміють як такі процеси, в які породжуються взаємовпливом процесів механічної та електричної природи, що є характерним для технічних систем із електричними машинами, що приводять до руху механічні складові для виконання функцій за призначенням. Автоматичний транспортувальний

засіб-шатл, що рухається за допомогою електричних двигунів, є одним із прикладом технічних систем, в яких відбуваються електромеханічні процеси.

Дослідження електромеханічних процесів ускладняється порівняно із дослідженнями суто механічних та суто електричних процесів через наявність власних ефектів, а також через вплив на власні частоти внаслідок взаємодії механічних та електричних компонентів складеної системи, що потребує відповідного вибору кроку інтегрування при використанні обчислювальних методів. Питання щодо дослідження електромеханічних процесів вивчаються вже досить тривалий час, та сьогодні маємо досить розвинені підходи щодо математичного моделювання таких процесів. Основою моделювання електромеханічних процесів є електромеханічні аналогії, відповідно з якими на основі тотожного вигляду диференціальних рівнянь суто механічних та суто електричних процесів можна вважати тотожними певні механічні та електричні величини. Більш того, існує декілька можливостей встановлення такої тотожності, що породжує різні системи електромеханічних аналогій, наприклад, встановлена тотожність таких понять як маса та індуктивність, сила та напруга, в'язкість та опір, жорсткість та зворотна ємність, координата та заряд, швидкість та струм.

У зв'язку тотожністю вигляду диференціальних рівнянь суто механічних та електричних процесів встановлена можливість використання рівнянь Лагранжа 2-го роду для побудови математичних моделей не тільки суто механічних, але й суто електричних систем. Завдяки цьому саме рівняння Лагранжа 2-го роду є теоретичною основою щодо математичного моделювання електромеханічних процесів. Формалізм Лагранжа при цьому зводиться до додавання кінетичної та потенціальної енергій, а також віртуальних робіт, притаманних механічним та електричним складовим, що приводять до електромеханічних процесів.

У зв'язку із тенденціями щодо механізації та електрифікації процесів внутрішньо-складської логістики, маємо електромеханічні процеси в їхніх

складових, у тому числі в автоматичних транспортувальних засобах-шатлах, що зрушуються за допомогою електричних двигунів та останнім часом отримали помітне розповсюдження. В той же час, у сучасній літературі не вдалося знайти досліджень, що присвячені електромеханічним процесам в складових внутрішньо-складських логістичних систем та в автоматичних транспортних засобах-шатлах тощо. Це пояснюється тим, що рівень технологій механізації та електрифікації внутрішньо-складських логістичних систем до недавнього часу не вимагав таких досліджень, і такі дослідження знадобились лише останнім часом у зв'язку із комплексною автоматизацією, впровадженням автоматичних транспортувальних засобів-шатлів, тощо. Належне представлення механізованих та електрифікованих складових внутрішньо-складських логістичних систем та передбачених в них автоматичних транспортувальних засобів-шатлів тощо як об'єктів комплексної автоматизації вимагає врахування притаманних їм електромеханічних процесів. За цих умов, для дослідження електромеханічних процесів в автоматичних транспортувальних засобах-шатлах бажано використовувати існуючі досить досконалі сучасні доробки у вигляді електромеханічних аналогій та рівнянь Лагранжа 2-го роду. Це вимагає математичного моделювання взаємодії механічної частини та електричних машин, що використовуються як рушії в автоматичних транспортувальних засобах-шатлах. Таке моделювання у загальному випадку є досить складним, але з урахуванням його спрямованості на розв'язування прикладних інженерних задач автоматизації має ґрунтуватися на відповідним чином запропонованих схематизація механічної частини та електричних машин, яке має спрощувати математичні моделі. В той же час, при спрощенні математичних моделей схематизація має враховувати основні риси притаманних електромеханічних процесів, що визначають властивості автоматичного транспортувального засоба-шатла як об'єкту автоматизації.

1.5 Висновки за першим розділом

У розділі розглянуто внутрішньо-складські логістичні системи як об'єкт автоматизації.

Визначено, що фокус удосконалення та дослідження повинен спиратися на процеси модернізації в виробничих внутрішньоскладських автоматизованих системах на основі концепції кіберфізичних підходів INDUSTRY 5.0, шляхом підвищення їх енергоощадливості та мобільності, автономності та модульності.

Одним із варіантів є використання у внутрішньо-складському приміщенні різного роду модернізованих та удосконалених систем автоматизації.

Було прийнято рішення обрати об'єктом автоматизації транспортні засоби- шатли.

Для вирішення завдань необхідно роздивитися комплексне завдання, що торкається не тільки конструкції та схематизації, а переглянути підходи системи прийняття рішень щодо керування транспортним-засобом шатлом, загальної концепції інтелектуалізації керування: математичні моделі та методи для реалізації автоматичного регулювання швидкості транспортувального шатла, його переміщення, гальмування, швидкості та параметрів навантаження, для забезпечення оптимальних умов енергоефективності та гнучкості процесів внутрішньо складської логістики.

Перелік використаних джерел у даному розділі наведено у повному списку використаних джерел під номерами [1- 46].

Матеріали цього розділу опубліковано в роботах автора [2, 4, 7, 10, 11, 14, 15.], що наведено в додатку И.

2 РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В АВТОМАТИЧНОМУ ТРАНСПОРТУВАЛЬНОМУ ЗАСОБІ-ШАТЛІ ДЛЯ ВНУТРІШНЬО- СКЛАДСЬКОЇ ЛОГІСТИКИ

2.1 Постановка задач моделювання електромеханічних процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі

Для подальшої електрифікації, механізації та автоматизації на більш широкий клас операцій пропонуються різноманітні засоби, у том у числі повністю автоматичні транспортувальні засоби-шатли для внутрішньо-складського транспортування вантажів у просторах проміж рядами стелажів.

Для забезпечення внутрішньо-складського транспортування вантажів зазвичай використовують засоби, що зрушуються за допомогою електричних машин різного типу, у тому числі електричних двигунів постійного струму.

Основним недоліком є вимога до точності завдання еталонної траєкторії, порушення якої в процесі роботи веде до порушення виконання всього технологічного процесу (ТП), при цьому таку ситуацію складно автоматично скоригувати, необхідно інтелектуалізація планування дій

В таких засобах маємо електромеханічні процеси при взаємодії електричних машин із механічним компонентами, що слід враховувати для створення удосконалених засобів автоматизації, що забезпечують повну автономність.

2.1.1 Конструкція автоматичного транспортувального засоба-шатла

Приклад конструктивного оформлення автоматичного транспортувального засоба-шатла, який є різновидом мобільного робота для переміщення вантажів проміж рядами стелажів показаний на рис. 2.1 [14].

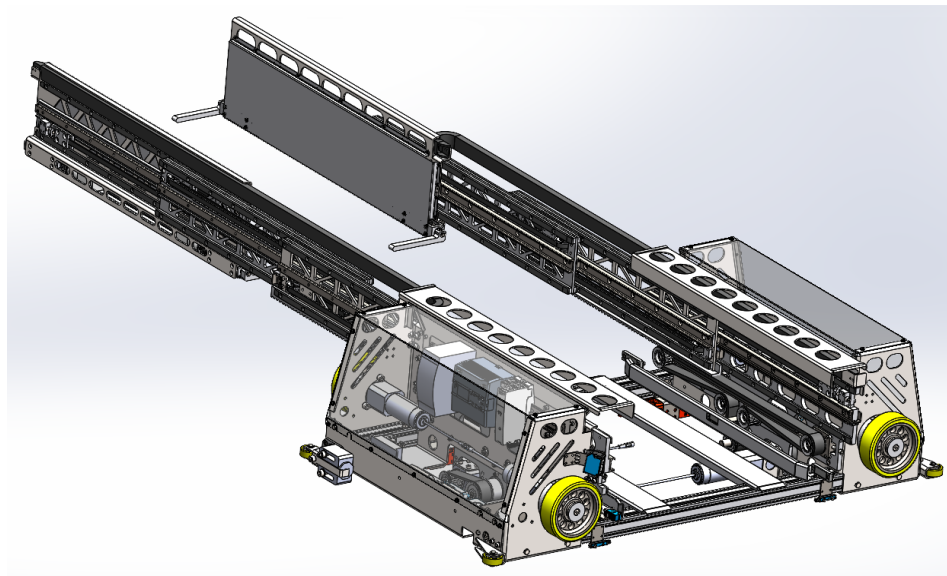
Бачимо (рис. 2.1) автоматичний транспортувальний засіб-шатл як електромеханічну чотириколісну платформу із розташуванням пари рушійних коліс з одного краю, а пари підтримуючих коліс – відповідно на протилежному краю; майданчик для транспортованого вантажу передбачено проміж осями коліс. В таких автоматичних транспортних засобах-шатлах для забезпечення рушійних зусиль зручним є використання електроприводів, оскільки вони мають невеликі габарити та не утворюють викидів до навколишнього середовища, що принципово важливо для закритих складських приміщень. Передбачається, що транспортувальний засіб-шатл (рис. 2.1) буде рухатись по спеціальним металевим напрямним, які заздалегідь встановлені проміж рядами стелажів на відповідному рівні. Можливість засоба-шатла переміщуватися між різними рівнями стелажів не передбачена для спрощення його конструкції та забезпечується окремою системою.

Компоновка автоматичного транспортувального засоба-шатла із центральним розташуванням вантажу (рис. 2.1) дозволяє оформити автоматизовані електроприводи рушійних коліс у вигляді досить компактного вузлів, що розташовані по краям засоба-шатла. При цьому, за рахунок спеціальної висувної системи (рис. 2.1 а) можна забезпечувати розвантаження транспортованого вантажу у двох напрямках, що дозволить обслуговувати два ряди стелажів одним таким засобом-шатлом. Певним недоліком компоновки транспортувального шатлу із розташуванням майданчику для вантажу (рис. 2.1) проміж вузлами автоматизованого електроприводу рушійних коліс насправді є досить жорсткі обмеження на один із розмірів транспортованого вантажу, що визначається довжиною відповідного проміжку, в якому саме й розташовано майданчик для

транспортованого вантажу. Зрозуміло, що такий недолік певним чином обмежує універсальність транспортувального шатла такої компоновки, але зазвичай транспортні засоби-шатли передбачені для обслуговування певних типорозмірів стелажів, отже такий недолік не є принциповим з точки зору використання такого шатла за призначенням, а лише обмежує можливості його переналаджування під обслуговування стелажів інших типорозмірів.



а)



б)

Рисунок 2.1 – Загальний вигляд (а) та внутрішня будова (б) шатла (мобільного робота) для внутрішньо-складського транспортування проміж рядами стелажів, запропонованого фірмою KapeLou [12]

Зрозуміло, що забезпечення повної автономності транспортних засобів-шатлів є принциповою, оскільки, окрім різних переваг, забезпечує також менші габарити за рахунок відсутності робочого місця для людини-оператора, а це дозволить зменшувати простір проміж рядами стелажів та дозволить зменшити довжину транспортувальних шляхів, що надають переваг системі внутрішньо-складського транспортування в цілому [59, 60].

Електропривід двох рушійних коліс, (рис. 2.1) в запропонованому автоматичному транспортувальному засобі-шатлі, передбачає індивідуальні електричні двигуни для рушійних коліс, безпосередньо з'єднанні із роторами електричних двигунів по типу мотор-колесо. Це є більш доцільним, ніж використання механічних або інших різновидів редукторів, оскільки сприяє зменшенню габаритів та спрощує конструкцію електроприводу. Осі обертання рушійних коліс та відповідно роторів електричних двигунів шатла співпадають в тому сенсі, що є продовженням одна одної, що дозволяє передбачити механічне з'єднання роторів (див. рис. 2.1). Завдяки з'єднанню роторів електричних двигунів протилежних мотор-колес шатла (див. рис. 2.1) при належному виборі характеристик рушійних електричних двигунів маємо можливість забезпечувати аварійне завершення виконання транспортувальної операції, навіть при раптовому виході із ладу електричного двигуна одного із двох мотор-колес шатла. Наявна можливість забезпечення руху шатла за рахунок лише одного із двох рушійних електричних двигунів транспортувального засоба-шатла дозволить створити більш сприятливі умови їхньої роботи. Дійсно, за означених умов при нормальній експлуатації рушійні електричні двигуни мотор-колес будуть працювати із меншими навантаженнями, а великі навантаження насправді будуть притаманні лише недовготривалим режимам завершення транспортувальної операції при відмові одного рушійного електричного двигуна.

Досить важливим питанням є вибір типу електричних двигунів для мотор-коліс автоматичного транспортувального шатла (див. рис. 2.1). Такий вибір має здійснюватися з не тільки з урахуванням вимог щодо потрібної потужності, компактності та економічності, а також із урахуванням наявних можливостей автоматичного управління перехідних та усталених режимів руху та точності позиціонування, що принципово необхідно для забезпечення повної автономності транспортувального засобу-шатла. Означеним тут вимогам досить повно задовольняють електричні двигуни постійного струму, причому вибір таких двигунів обумовлений саме розширеними можливостями щодо автоматизованого управління при досить високих їхніх можливостях щодо потужності, компактності та економічності.

2.1.2 Розрахункова схема автоматичного транспортувального засоба-шатла

З урахуванням означених у п. 2.1.1 обставин, типовий автоматичний транспортувальний засіб-шатл (див. рис. 2.1) для внутрішньо-складської логістики, маємо як досить складну електромеханічну систему. При цьому, такий транспортувальний засіб-шатл (див. рис. 2.1) є досить складним об'єктом автоматизації, оскільки для нього слід забезпечувати автоматизацію як усталених та й перехідних режимів при наявності окремих спеціальних вимог щодо точності позиціонування та, можливо, плавності рухів при бажаній мінімізації енергоспоживання. Розв'язування, кожної із означених та інших задач автоматизації транспортувального засоба-шатла, потребує належного врахування притаманних йому властивостей, що можна забезпечити за рахунок використання відповідних математичних моделей процесів [62-64], що відбуваються на різних режимах експлуатації.

Математична модель, яка визначатиме процеси в транспортувальному засобі-шатлі на усіх режимах його експлуатації, буде досить складною як для побудови, так й для подальшого використання при розв'язуванні питань щодо

автоматизації [65]. За цих умов більш раціональним є схематизація транспортувального засоба-шатла, яка дозволить зосереджуватись на одному окремому досліджуваному питанні та дозволить використовувати більш прості математичні моделі. В якості окремих досліджуваних питань щодо транспортувального засоба-шатла розглядатимемо забезпечення горизонтального переміщення вантажу, що насправді є однією із основних функцій. Для розгляду низки таких питань для розглянутого вище у п. 2.1.1 транспортувального засоба-шатла (див. рис. 2.1) достатньо використовувати його схематизацію у вигляді, як показано на рис. 2.2 [66]. За прийнятою схематизацією (рис. 2.2 а) розглядаємо транспортувальний засіб-шатл -1 як чотириколісну платформу, що рухається прямолінійно за рахунок обертання коліс-2 та перевозить на собі вантаж-3. Зрозуміло, що стан механічної частини транспортувального засоба-шатла (рис. 2.2 а) при його рухах протягом експлуатації насправді змінюється протягом часу для прийнятої схематизації буде визначатися функціями часу:

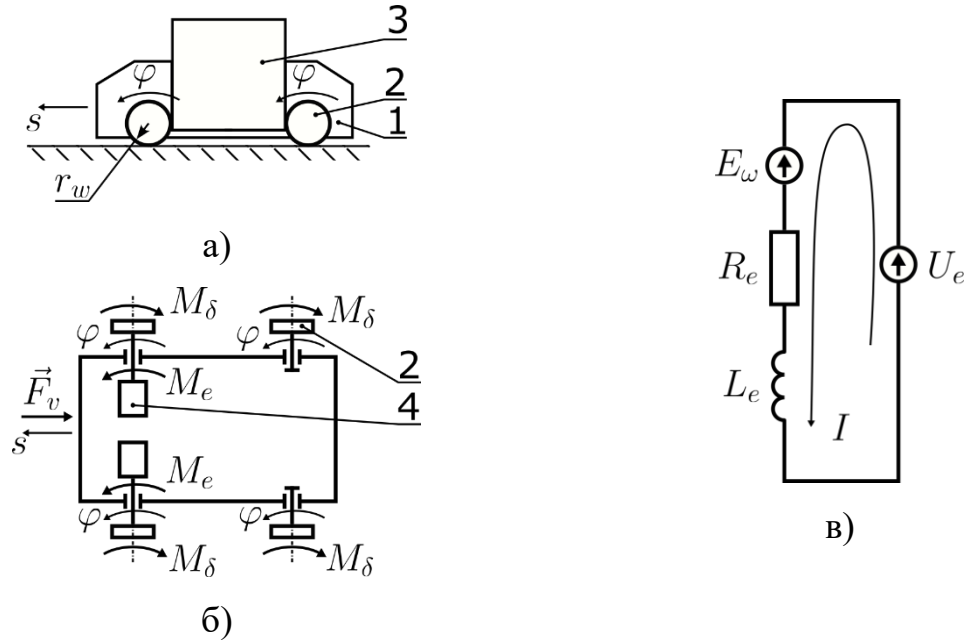
$$s = s(t), \quad \varphi = \varphi(t), \quad (2.1)$$

де s – прямолінійна координата, яка визначає положення транспортувального засоба-шатла; φ – кут повороту коліс транспортувального засоба-шатла; t – час, протягом якого здійснюється рух транспортувального засоба-шатла.

Прямолінійний рух транспортувального засоба-шатлу, забезпечується обертанням коліс, на які він спирається (рис. 2.2 а). Проковзування коліс на напрямних вважаємо відсутнім через гарні умови контакту, що забезпечуються у закритих складських сховищах при належному догляді. Завдяки цьому прямолінійна координата транспортувального засоба-шатла та кут повороту його коліс (2.1) зв'язані співвідношенням такого вигляду:

$$\dot{s} = r_w \dot{\varphi}, \quad (2.2)$$

де r_w – радіус коліс транспортувального засоба-шатла (рис. 2.2 а).



1 – ; 2 – колесо; 3 – вантаж; 4 – електричний двигун

Рисунок 2.2 – Загальна (а), кінематична (б) схеми та еквівалентна електрична схема електродвигунів (в) засоба-шатла внутрішньо-складського транспортування

З урахуванням зазначених вище у п. 2.1.1 особливостей виконання транспортувального засоба-шатла (див. рис. 2.1) кінематичну схему представимо у спрощеному вигляді, як на рис. 2.2 б. В цій кінематичній схемі (рис. 2.2 б) враховано наявність двох опорних та двох рушійних мотор-колів із індивідуальними електричними двигунами.

Для належного відтворення властивостей транспортувального засоба-шатла слід врахувати тертя кочення коліс (див. рис. 2.2 б):

$$|M_\delta| \leq M_\delta^{\max}, \quad M_\delta^{\max} \approx \frac{1}{4} mg\delta, \quad (2.3)$$

де M_δ та M_δ^{\max} – момент тертя кочення колеса та його граничне значення, відповідне зрушенню колеса; m – повна маса транспортувального засоба-шатла; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; δ – коефіцієнт тертя кочення колеса.

Врахування моменту тертя кочення коліс (2.3) важливе для оцінки руху транспортувального засоба-шатла, але його врахування призводить до суттєвої не лінійності, якої досить важко позбавитись шляхом лінеаризації без втрати можливостей щодо врахування частини властивостей транспортувального засоба-шатла на перехідних режимах руху.

Для належного відтворення властивостей транспортувального засоба-шатла також слід враховувати в'язкий опір руху (див. рис. 2.3 б):

$$|\vec{F}_v| = b|\dot{s}|, \quad (2.4)$$

де \vec{F}_v – сумарна сила в'язкого опору та b – інтегральний коефіцієнт в'язкого опору транспортувального засоба-шатла.

Лінійна залежність (2.4) прийнята через відносно невисокі швидкості автоматичних транспортувальних засобів-шатлів, яка для розглянутого на рис. 2.1 обмежена 2 м/с. В'язкий опір транспортувального засоба-шатла обумовлений не тільки аеродинамічними силами опору поступальному руху (див. рис. 2.2 б), а також й іншим рухам, у тому числі обертанням роторів електричних двигунів та коліс. Врахування в'язкого опору представляє досить складну задачу та потребує, але таке врахування насправді можливе також за рахунок відповідного корегування значення b інтегрального коефіцієнту в'язкого тертя, яке власне й можна та досить легко підібрати шляхом відповідних вимірювань при проведенні необхідних натурних випробувань.

Рух транспортувального засоба-шатла має забезпечуватися за рахунок підведення енергії. Вважаємо, що обертання рушійних коліс

транспортувального засоба-шатла забезпечуються за рахунок електромагнітних обертальних моментів (див. рис. 2.2 б), які утворюються внаслідок подачі до тяглових електричних двигунів постійного струму живильної напруги та для даного електричного двигуна визначаються електричним струмом його ротору:

$$M_e = B_e I, \quad (2.5)$$

де M_e та B_e – електромагнітний обертальний момент та електромеханічна характеристика електричного двигуна постійного струму; I – електричний струм в ланцюзі ротору електричного двигуна постійного струму.

Для визначення електромагнітного моменту (2.5) слід розглянути електричну частину транспортувального засоба-шатла, яку будемо представляти у вигляді еквівалентного електричного ланцюга ротору електричного двигуна постійного струму, як це показано вище на рис. 2.2 в, що складається із послідовно з'єднаних активного опору R_e , індуктивного опору L_e , а також джерел E_ω та U_e електрорушійних сил.

Джерело електрорушійної сили U_e насправді представляє собою джерело енергії, що забезпечує обертання ротору рушійного електричного двигуна, а джерело E_ω електрорушійної сили самоіндукції представляє собою електрорушійну силу, що виникає внаслідок обертання провідників обмотування ротору із електричним струмом в магнітному полі електричного двигуна, та визначається так:

$$E_\omega = B_e \dot{\phi}. \quad (2.6)$$

Слід зазначити, що електрорушійна сила E_ω за природою самоіндукції протидіє електрорушійній силі U_e , яка призводить до обертання ротору електричного двигуна (див. рис. 2.2 в).

Прийнята схематизація (див. рис. 23) транспортувального засоба-шатла та сформульовані припущення щодо факторів впливу дозволять досліджувати електромеханічні процеси, що відбуваються при прямолінійному русі, яким забезпечується функція горизонтального переміщення вантажів проміж рядами стелажів.

2.2 Математичне моделювання електромеханічних процесів в транспортувальному засобі-шатлі

Електромеханічні транспортувальні засоби-шатли є складними технічними об'єктами [59], що складаються із взаємодіючих механічної, електричної та електронної частин, які забезпечують виконання функцій за призначенням.

2.2.1 Методи математичного моделювання електромеханічних процесів

Розглянемо загальні підходи щодо математичного моделювання процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі (див. рис. 2.2 а) при горизонтальному транспортуванні вантажів відповідно прийнятої схематизації (див. п. 2.1.2).

В прийнятій схематизації (див. рис. 2.2) маємо співвідношення (2.2), яке можемо проінтегрувати у часі:

$$\int \dot{s} dt = \int r_w \dot{\varphi} dt \Rightarrow s = r_w \varphi + C, \quad (2.6)$$

де C – стала інтегрування.

Вибір сталої інтегрування у співвідношенні (2.6) визначається відліком прямолінійної координати та куту повороту коліс (2.1). Далі приймаємо таке:

$$s = 0 \Leftrightarrow \varphi = 0 \Rightarrow C = 0. \quad (2.7)$$

Завдяки прийнятому відліку координати та кута повороту та відповідного йому значення (2.7) сталої інтегрування співвідношення (2.6) набуде вигляду:

$$s = r_w \varphi. \quad (2.8)$$

Співвідношення (2.2) свідчить, що механічна частина транспортувального засоба-шатла є головною системою. Електрична система (див. рис. 2.2) також є головною системою, оскільки струми в ній зв'язані першим правилом Кірхгофа та можна інтегрувати. Використовуємо електромеханічні аналогії, за якими електричним аналогом механічної координати є електричний заряд, сили – електричне напруження, маси – індуктивність, в'язкого опору – електричний опір, пружних сил – зворотна електрична ємність. Транспортувальний засіб-шатл уявляємо як головну електромеханічну систему і використовуємо загальну форму математичних моделей таких систем у вигляді рівнянь Лагранжа 2-го роду [67] та відповідних їм початкових умов:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial L}{\partial q_k} = -\frac{\partial R}{\partial \dot{q}_k} + Q_k, \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (2.9)$$

$$q_k(t_0) = q_k^{(0)}, \quad \dot{q}_k(t_0) = \dot{q}_k^{(0)}, \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (2.10)$$

де N – кількість ступенів вільності транспортувального засоба-шатла як електромеханічної системи; q_1, q_2, \dots, q_N та $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_N$ – узагальнені

координати та швидкості транспортувального засоба-шатла як електромеханічної системи; L – кінетичний потенціал; R – дисипативна функція Релея; Q_k – узагальнена сила, яка не відноситься ні до потенціальних ні до дисипативних; t_0 – момент часу, що розглядається як початковий; $q_k^{(0)}$ та $\dot{q}_k^{(0)}$ задані значення узагальненої координати та швидкості в початковий момент часу $t = t_0$.

Узагальнені координати транспортувального засоба-шатла мають різну фізичну природу: частина координат визначає має механічну, а інша частина – електричну природу. Особливості конструкцій транспортувального засоба-шатла у рівняннях (2.9) враховуються відповідним виглядом узагальнених координат, кінетичного потенціалу, дисипативної функції Релея та узагальнених сил, які можна представити у лінеарізованому вигляді:

$$L \approx \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N m_{ij} \dot{q}_i \dot{q}_j - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} q_i q_j, R \approx \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N b_{ij} \dot{q}_i \dot{q}_j, Q_k \approx \sum_{j=1}^N p_{kj} \dot{q}_j + u_k(t), \quad (2.11)$$

де m_{ij} , c_{ij} та b_{ij} – узагальнені характеристики інерції, жорсткості та в'язкості; p_{kj} та $u_k(t)$ ($k = 1, 2, \dots, N$) – узагальнені характеристики рушійних сил для транспортувального засоба-шатла як електромеханічної системи.

Завдяки виразам (2.11) рівняння (2.10) приймуть вигляд:

$$\sum_{j=1}^N m_{kj} \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^N b_{kj} \dot{q}_j + \sum_{j=1}^N c_{kj} q_j = \sum_{j=1}^N p_{kj} \dot{q}_j + u_k(t), \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (2.12)$$

Диференціальні рівняння (2.12) і початкові умови (2.10) надають узагальнену лінеарізовану математичну модель електромеханічних процесів в транспортувальному засобі-шатлі за прийнятою схематизацією.

Лінеаризована математична модель процесів є вкрай важливою для розгляду інженерних питань щодо автоматичних регуляторів. Широкий клас транспортувальних засобів-шатлів через специфіку конструкції [68-71] може представлятися безпосередньо лінійними диференціальними рівняннями, але нелінійності тертя кочення (2.3) є суттєвими, та їхня лінеаризація можлива лише для окремих режимів руху.

2.2.2 Математична модель електромеханічних процесів транспортувального засоба-шатла

Деталізація відтворення електромеханічних процесів у транспортувальному засобі-шатлі математичними моделями на основі рівнянь Лагранжа 2-го роду (2.9) визначається вибором узагальнених координат. Якщо кількість таких координат є великою, то це дозволяє досліджувати вплив інженерних рішень на процеси на різних рівнях. Однак, такі деталізовані математичні моделі є досить складними для використання, і при розв'язуванні деяких інженерних задач [71-73] бажано мати математичні моделі із невеликою кількістю ступенів вільності, що дозволять здійснювати аналітичні перетворення для отримання необхідних співвідношень у явному вигляді. Розглянемо далі математичну модель транспортувального засоба-шатла, яка не є дуже складною, але забезпечує належне відтворення властивостей. Зрозуміло, що така математична модель на основі рівнянь Лагранжа 2-го роду відповідає відповідному вибору узагальнених координат. В межах прийнятої схематизації (див. рис. 2.2) слід передбачити як мінімум дві узагальнені координати по одній для визначення механічної та електричної частини:

$$q_1 = \varphi, \quad q_2 = \kappa, \quad (2.13)$$

де $к$ – електричний заряд в еквівалентному електричному ланцюзі (див. рис. 2.2 в), що схематизує електричні двигуни постійного струму.

Узагальнені координати (2.13) визначають стан транспортувального засоба-шатла відповідно прийнятій схематизації (див. рис. 2.2). За допомогою визначення (2.13) та співвідношення (2.8) маємо стан механічної частини:

$$s = r_w q_1, \quad \varphi = q_1. \quad (2.14)$$

Визначення (2.13) та відомий із фізики зв'язок між електричним струмом та електричним зарядом дозволить визначити стан електричної частини:

$$к = q_2, \quad I = \dot{q}_2. \quad (2.15)$$

Більш глибока деталізація процесів в транспортувального засоба-шатла можлива шляхом збільшення кількості узагальнених координат, що за потреби може бути здійснено відповідним чином і не є принциповим, тому розглядаємо його далі як електромеханічну систему з двома ступенями вільності та узагальненими координатами (2.13). Використання рівнянь Лагранжа 2-го роду (2.9) потребує визначення кінетичного потенціалу, дисипативної функції та узагальнених сил транспортувального засоба-шатла відповідно прийнятій схематизації (див. рис. 2.2) для узагальнених координат (2.13).

Кінетичний потенціал – це різниця кінетичної та потенціальної енергій системи, яка з урахуванням електромеханічних аналогій та узагальнених координат (2.13) для транспортувального засоба-шатла має вигляд:

$$L = \frac{1}{2} m \dot{s}^2 + 4 \frac{1}{2} J_w \dot{\varphi}^2 + 2 \frac{1}{2} J_e \dot{\varphi}^2 + 2 \frac{1}{2} L_e I^2, \quad (2.16)$$

де J_e та J_w – моменти інерції ротору електричного двигуна та колеса транспортувального засоба-шатла відносно їхніх осей обертання.

Завдяки виразам (2.14), (2.15) кінетичний потенціал (2.16) буде таким:

$$L = \frac{1}{2} (mr_w^2 + 4J_w + 2J_e) \dot{q}_1^2 + 2\frac{1}{2} L_e \dot{q}_2^2. \quad (2.17)$$

Для спрощення подальшого викладення зручно ввести до розгляду величину:

$$J = mr_w^2 + 4J_w + 2J_e, \quad (2.18)$$

де J – узагальнений момент інерції транспортувального засоба-шатла, приведений до осі обертання ротору рушійного електричного двигуна.

Величина (2.18) скорочує запис кінетичного потенціалу (2.17):

$$L = \frac{1}{2} J \dot{q}_1^2 + 2\frac{1}{2} L_e \dot{q}_2^2. \quad (2.19)$$

Маємо кінетичний потенціал для транспортувального засоба-шатла в остаточному вигляді (2.19), який відповідний до прийнятої схематизації (див. рис. 2.2) та до прийнятих узагальнених координат (2.13).

Дисипативна функція Релея представляє взятую із протилежним знаком половину потужності дисипативних сил системи. Для транспортувального засоба-шатла з урахуванням прийнятої схематизації (див. рис. 2.2), в'язкого опору (2.4), електромеханічних аналогій та узагальнених координат (2.13) маємо:

$$R = \frac{1}{2} b \dot{s}^2 + 2\frac{1}{2} R_e I^2. \quad (2.20)$$

Завдяки виразам (2.14), (2.15) функція Релея (2.20) набуде вигляду:

$$R = \frac{1}{2} b r_w^2 \dot{q}_1^2 + 2 \frac{1}{2} R_e \dot{q}_2^2. \quad (2.21)$$

Для спрощення зручно ввести до розгляду таку величину:

$$B = b r_w^2, \quad (2.22)$$

де B – узагальнений коефіцієнт в'язкого опору, приведений до осі обертання ротору електричного двигуна.

Величина (2.22) скорочує запис функції Релея (2.21):

$$R = \frac{1}{2} B \dot{q}_1^2 + 2 \frac{1}{2} R_e \dot{q}_2^2. \quad (2.23)$$

Маємо дисипативну функцію Релея для транспортувального засоба-шатла в остаточному вигляді (2.23), який відповідний до прийнятої схематизації (див. рис. 2.22) та узагальнених координат (2.13).

Для визначення узагальнених сил слід визначити суму віртуальних робіт сил, що не є потенціальними та дисипативними, або не були розглянуті як такі. Для транспортувального засоба-шатла в межах прийнятої схематизації (див. рис. 2.2) з урахуванням моменту тертя кочення (2.3), обертального електромагнітного моменту (2.5) та напруги самоіндукції (2.6) й живлення електричних двигунів матимемо суму віртуальних робіт у такому вигляді:

$$\delta A = -4M_\delta \delta \varphi + 2M_e \delta \varphi - 2E_\omega \delta k + 2U_e \delta k, \quad (2.24)$$

де δA – сума віртуальний робіт сил; $\delta\varphi$ та $\delta\kappa$ – варіації кута повороту та електричного заряду.

Варіації $\delta\varphi$ та $\delta\kappa$ з урахуванням другого співвідношення (2.14) та першого співвідношення (2.15) набудуть такого вигляду:

$$\delta\varphi = \delta q_1, \quad \delta\kappa = \delta q_2. \quad (2.25)$$

Завдяки виразам (2.25) сума віртуальних робіт сил (2.24) після врахування подібних доданків та виразів (2.3), (2.5), (2.6), (2.14), (2.15) запишеться так:

$$\delta A = (-mg\delta + 2B_e\dot{q}_2)\delta q_1 + (-2B_e\dot{q}_1 + 2U_e)\delta q_2. \quad (2.26)$$

Завдяки результату (2.26) матимемо узагальнені сили транспортувального засоба-шатла у такому вигляді:

$$Q_1 = -mg\delta + 2B_e\dot{q}_2, \quad Q_2 = 2(-B_e\dot{q}_1 + U_e). \quad (2.27)$$

Таким чином, маємо узагальнені сили для транспортувального засоба-шатла в остаточному вигляді (2.26), який відповідний до прийнятої схематизації (див. рис. 2.2) та до прийнятих у вигляді (2.13) узагальнених координат.

Для побудови математичної моделі транспортувального засоба-шатла, використовуємо електромеханічні аналогії та рівняння Лагранжа 2-го роду [74,75], кінетичний потенціал (2.19), дисипативну функцію Релея (2.23) та узагальнені сили вигляду (2.27). В результаті матимемо математичну модель – систему двох диференціальних рівнянь в такому вигляді:

$$J\ddot{q}_1 = -B\dot{q}_1 + 2B_e\dot{q}_2 - mg\delta, \quad (2.28)$$

$$L_e \ddot{q}_2 = -B_e \dot{q}_1 - R_e \dot{q}_2 + U_e(t). \quad (2.29)$$

Диференціальні рівняння (2.28), (2.29) розглядаємо із початковими умовами:

$$q_1(t_0) = \varphi_0, \quad \dot{q}_1(t_0) = \omega_0, \quad q_2(t_0) = \kappa_0, \quad \dot{q}_2(t_0) = I_0, \quad (2.30)$$

t_0 – момент часу, що розглядається як початковий; φ_0 та ω_0 задані значення кута повороту та кутової швидкості колеса, а κ_0 та I_0 задані значення електричного заряду та сили струму еквівалентного ланцюга електричного двигуна в початковий момент часу $t = t_0$.

У вигляді (2.28)–(2.30) маємо математичну модель процесів в транспортувальному засобі-шатлі в межах прийнятої схематизації (див. рис. 2.2) та узагальнених координат (2.13). Математична модель (2.28)–(2.30) відповідає окремому випадку математичної моделі (2.12), (2.10), в якому

$$N = 2, \quad (2.31)$$

$$m_{11} = J, \quad m_{12} = 0, \quad m_{21} = 0, \quad m_{22} = L_e, \quad (2.32)$$

$$c_{11} = 0, \quad c_{12} = 0, \quad c_{21} = 0, \quad c_{22} = 0, \quad (2.33)$$

$$b_{11} = B, \quad b_{12} = 0, \quad b_{21} = 0, \quad b_{22} = R_e, \quad (2.34)$$

$$p_{11} = 0, \quad p_{12} = B_e, \quad b_{21} = B_e, \quad b_{22} = 0, \quad (2.35)$$

$$u_1 = 0, \quad u_2 = U_e. \quad (2.36)$$

Зрозуміло, що математична модель (2.28)–(2.30), насправді, представляє транспортувальний засіб-шатл як електромеханічну систему та з урахуванням співвідношень (2.14) дозволяє визначати стан механічної та електричної частини досліджуваного транспортувального засоба-шатла, але деталізація обмежена прийнятою схематизацією (див. рис. 2.2). Математична

модель (2.28)–(2.30) є обмеженою через те, що в диференціальному рівнянні (2.28) неврахована властивість (2.3) моменту тертя кочення, і це рівняння є справедливим насправді лише для окремого випадку руху досліджуваного транспортувального засоба-шатла, коли $\dot{q}_1 > 0$. Невважаючи на означену обмеженість, така математична модель (2.28)–(2.30) має вагому привабливість через властивість її лінійності, що дозволяє використовувати цю модель для отримання певних аналітичних результатів.

Для забезпечення можливостей використання математичної моделі (2.28)–(2.30) щодо дослідження процесів в транспортувальному засобі-шатлі не тільки для випадків $\dot{q}_1 > 0$ слід врахувати нелінійність, обумовлену через властивість (2.3) моменту тертя кочення. Щоб врахувати в диференціальному рівнянні (2.28) таку нелінійність, введемо до розгляду функцію:

$$M(\dot{q}_1, \dot{q}_2) = \begin{cases} -B\dot{q}_1 + 2B_e\dot{q}_2 - mg\delta \operatorname{sign}(\dot{q}_1), & \dot{q}_1 \neq 0, \\ \frac{1}{2}(|2B_e|\dot{q}_2| - mg\delta| + 2B_e|\dot{q}_2| - mg\delta) \operatorname{sign}(\dot{q}_2), & \dot{q}_1 = 0. \end{cases} \quad (2.37)$$

Введена у вигляді (2.37) функція $M(\dot{q}_1, \dot{q}_2)$ визначає насправді узагальнену силу, що діє на механічну частину досліджуваного транспортувального засобу-шатлу внаслідок обертальних моментів рушійних електричних двигунів, сил в'язкого опору та моментів тертя кочення. В узагальненій силі (2.37) врахована властивість (2.3) моменту тертя кочення. Бачимо, що узагальнена сила (2.37) є істотно нелінійною, і її лінеаризація є можливою лише для окремих режимів руху транспортувального засоба-шатла, а саме для випадків $\dot{q}_1 > 0$ та $\dot{q}_1 < 0$. Так, наприклад, у випадку $\dot{q}_1 > 0$ узагальнена сила (2.37) може бути представлена в лінеаризованому вигляді:

$$M(\dot{q}_1, \dot{q}_2) = -B\dot{q}_1 + 2B_e\dot{q}_2 - mg\delta. \quad (2.38)$$

Лінеаризовану узагальнену силу (2.38) можна використовувати у випадку

$$\dot{q}_1 \geq 0, \dot{q}_2 > 0, 2B_e \dot{q}_2 - mg\delta > 0. \quad (2.39)$$

Маємо, що лінійне диференціальне рівняння (2.28) відповідає лінеаризованій узагальненій силі (2.39), і може представляє процеси в транспортувальному засобі-шатлі на режимах руху (2.39). У загальному випадку руху транспортувального засоба-шатла (див. рис. 2.2) диференціальне рівняння (2.28) має вигляд:

$$J\ddot{q}_1 = M(\dot{q}_1, \dot{q}_2). \quad (2.40)$$

Для узагальненої сили (2.37) диференціальне рівняння (2.40) є нелінійним, і саме таке нелінійне рівняння можна використовувати для дослідження процесів в межах прийнятої схематизації (див. рис. 2.2). Лінеаризація узагальненої сили (2.37) дозволить суттєво спростувати дослідження різних окремих режимів руху транспортувального засоба-шатла. Наприклад відповідна обмеженням (2.39) лінеаризована узагальнена сила (2.38) відповідатиме лінійному диференціальному рівнянню (2.40), яке прийме одержаний вище вигляд (2.28). З урахуванням означених обставин, маємо відповідну вище прийнятій схематизації (див. рис. 2.2) математичну модель процесів в транспортувальному засобі-шатлі як в електромеханічній системі у вигляді нелінійного звичайного диференціального рівняння (2.40), (2.37), лінійного звичайного диференціального рівняння (2.29) та відповідних їм початкових умов (2.30). Ця математична модель у загальному випадку для заданої залежності від часу електричної напруги живлення $U_e = U_e(t)$, що подається на рушійні електричні двигуни, дозволяє відтворювати процеси в

транспортному засобі-шатлі як в електромеханічній системі, але із деталізацією в межах прийнятої схематизації (див. рис. 2.2).

2.3 Дослідження математичної моделі електромеханічних процесів транспортувального засоба-шатла

2.3.1 Дослідження диференціальних рівнянь шляхом зменшення порядку та їх лінеаризації

Розглянемо далі різні тотожні форми математичної моделі транспортувального засоба-шатла загального вигляду (2.40), (2.37), (2.29), (2.30).

Спрощення запису диференціальних рівнянь (2.40), (2.37) та (2.29) із початковими умовами (2.30) можна здійснити введенням нових змінних:

$$\omega = \dot{q}_1, \quad I = \dot{q}_2, \quad (2.41)$$

де $\omega = \omega(t)$ – кутова швидкість обертання коліс транспортувального засобу-шатла, яка у загальному випадку залежить від часу t ; $I = I(t)$ – залежний у загальному випадку від часу t струм в обмотуванні роторів рушійних електричних двигунів транспортувального засобу-шатла.

З урахуванням визначень (2.41) диференціальні рівняння (2.40), (2.37) та (2.29) із початковими умовами (2.30) набудуть більш простого вигляду:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M(\omega, I), \quad L_e \frac{dI}{dt} = -B_e \omega - R_e I + U_e(t), \quad (2.42)$$

$$\omega(t_0) = \omega_0, \quad I(t_0) = I_0. \quad (2.43)$$

В першому диференціальному рівнянні використовується вираз (2.42), який для введених нових змінних (2.41) набуде такого вигляду:

$$M(\omega, I) = \begin{cases} -B\omega + 2B_e x_4 - mg\delta \operatorname{sign}(\omega), & \omega \neq 0, \\ \frac{1}{2}(|2B_e |I| - mg\delta| + 2B_e |I| - mg\delta) \operatorname{sign}(I), & \omega = 0. \end{cases} \quad (2.44)$$

Математична модель (2.42)–(2.44) дозволяє визначати лише невідомі (2.41), а для визначення власне узагальнених координат (2.13) слід додатково розглянути таку систему диференціальних рівнянь із початковими умовами:

$$\dot{q}_1 = \omega(t), \quad \dot{q}_2 = I(t), \quad q_1(t_0) = \varphi_0, \quad q_2(t_0) = \kappa_0. \quad (2.45)$$

Диференціальні рівняння із початковими умовами (2.42)–(2.45) є насправді еквівалентною формою запису загального вигляду математичної моделі (2.40), (2.37), (2.29), (2.30) транспортувального засобу-шатла. Перевагою вигляду (2.42)–(2.45) математичної моделі є можливість окремо розглядати задачу (2.42)–(2.44) та задачу (2.45), що у багатьох випадках значно спрощує виконання досліджень.

Відповідно до нерівності (2.39) та визначень (2.41) маємо умови, за яких можливо здійснити лінеаризацію виразу (2.44), в такому вигляді:

$$\omega \geq 0, \quad I > 0, \quad 2B_e I - mg\delta > 0. \quad (2.46)$$

За умов (2.46) замість нелінійного співвідношення (2.44) можна використати його лінеаризацію, яка за рівності (2.38) та визначень (2.41) прийме вигляд:

$$M(\omega, I) = -B\omega + 2B_e I - mg\delta. \quad (2.47)$$

Отже, можемо розглядати відповідні виразу (2.47) більш прості рівняння:

$$J \frac{d\omega}{dt} = -B\omega + 2B_e I - mg\delta, \quad L_e \frac{dI}{dt} = -B_e \omega - R_e I + U_e(t). \quad (2.48)$$

Систему лінійних диференціальних рівнянь (2.48) розглядаємо з урахуванням початкових умов (2.43). Диференціальні рівняння із початковими умовами (2.48), (2.43), (2.45) є еквівалентною формою запису математичної моделі (2.40), (2.37), (2.29), (2.30) транспортувального засоба-шатла у випадках (2.46).

2.3.2 Дослідження диференціального рівняння відносної кутової швидкості коліс транспортувального засоба-шатла

Як було показано вище у п. 2.3.1, визначення кутової швидкості коліс та струму в обмотуванні роторів рушійних електричних двигунів (2.41) транспортувального засоба-шатла може бути зведено до розв'язування системи двох диференціальних рівнянь першого порядку із відповідним початковими умовами (2.42)–(2.44), а у випадках (2.46) – до системи двох лінеаризованих рівнянь (2.48) із початковими умовами (2.43). Такі системи рівнянь можемо спростити, щоб мати в результаті одне диференціальне рівняння другого порядку відносно кутової швидкості коліс транспортувального засоба-шатла.

Спочатку отримаємо розв'язувальне звичайне диференціальне рівняння відносно кутової швидкості коліс транспортувального засоба-шатла та необхідні початкові умови в загальному випадку. Для цього розв'яжемо перше співвідношення (2.42) відносно струму та представимо його у вигляді:

$$I = \mu(\omega, \dot{\omega}), \quad (2.49)$$

де $\mu(\omega, \dot{\omega})$ така функція, що забезпечує тотожність $J\dot{\omega} \equiv M(\omega, \mu(\omega, \dot{\omega}))$, тобто виконання першого рівняння (2.42).

Далі підставимо вираз (2.49) до другого диференціального рівняння (2.42) та в результаті матимемо таке:

$$L_e \frac{\partial \mu}{\partial \dot{\omega}} \frac{d^2 \omega}{dt^2} + L_e \frac{\partial \mu}{\partial \omega} \frac{d\omega}{dt} + R_e \mu \left(\omega, \frac{d\omega}{dt} \right) + B_e \omega = U_e(t). \quad (2.50)$$

Звичайне диференціальне рівняння другого порядку (2.50) слід розглядати із двома початковими умовами, одне із яких – це перша умова (2.43), а друге непрямо визначає похідну кутової швидкості в початковий момент часу за допомогою другої умови (2.43) та співвідношення (2.49):

$$\omega(t_0) = \omega_0, \quad \mu \left(\omega_0, \frac{d\omega}{dt}(t_0) \right) = I_0. \quad (2.51)$$

Таким чином, замість системи двох нелінійних звичайних диференціальних рівнянь першого порядку із початковими умовами (2.42)–(2.44) маємо одне нелінійне звичайне диференціальне рівняння другого порядку (2.50) із двома початковими умовами (2.51), що дозволяє визначити кутову швидкість коліс (2.41) транспортувального засобу-шатла. Визначена кутова швидкість коліс дозволить за допомогою співвідношення (2.49) визначити електричний струм в обмотуванні роторів електричних двигунів транспортувального засобу-шатла. Отже, математична модель (2.49)–(2.51) еквівалентна отриманій раніше математичній моделі (2.42)–(2.44). Переваги математичної моделі (2.49)–(2.51) обумовлені можливістю визначати кутову швидкість коліс окремо від струму в обмотуванні роторів електричних

двигунів транспортувального засобу-шатлі можуть бути корисними при виконанні деяких досліджень.

Для співвідношення (2.44) досить важко записати відповідне йому співвідношення (2.49), але це можливо для лінеаризованого у вигляді (2.47) співвідношення (2.44). У випадку розгляду лінеаризованого співвідношення (2.47) матимемо перше диференціальне рівняння (2.48) у такому вигляді:

$$I = \frac{J}{2B_e} \frac{d\omega}{dt} + \frac{B}{2B_e} \omega + \frac{mg\delta}{2B_e}. \quad (2.52)$$

Порівняння співвідношень (2.52) та (2.49) дозволяє записати:

$$\mu(\omega, \dot{\omega}) = \frac{J}{2B_e} \dot{\omega} + \frac{B}{2B_e} \omega + \frac{mg\delta}{2B_e}. \quad (2.53)$$

З урахуванням виразу (2.53) диференціальне рівняння (2.50) та початкові умови (2.51) набудуть такого вигляду:

$$\frac{L_e J}{2B_e} \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{L_e B + R_e J}{2B_e} \frac{d\omega}{dt} + \left(\frac{R_e B}{2B_e} + B_e \right) \omega = U_e(t) - \frac{R_e}{2B_e} mg\delta, \quad (2.54)$$

$$\omega(t_0) = \omega_0, \quad \frac{d\omega}{dt}(t_0) = \frac{2B_e}{J} I_0 - \frac{B}{J} \omega_0 - \frac{mg\delta}{J}. \quad (2.55)$$

У випадку (2.46) замість нелінійного диференціального рівняння (2.50) із початковими умовами (2.51) можемо розглядати лінійне диференціальне рівняння зі сталими коефіцієнтами (2.54) із початковими умовами (2.55).

2.3.3 Дослідження диференціального рівняння електричного струму живлення рушійних електричних двигунів транспортувального засоба-шатла

Визначення кутової швидкості коліс та струму в обмотуванні роторів рушійних електричних двигунів (2.41) транспортувального засоба-шатла зведено до розв'язування системи двох диференціальних рівнянь першого порядку із відповідним початковими умовами (2.42)–(2.44), а у випадках (2.46) – до системи двох лінеаризованих рівнянь (2.48) із початковими умовами (2.43). Такі системи рівнянь можемо спростити, щоб мати в результаті одне звичайне диференціальне рівняння другого порядку відносно струму в обмотуванні ротору електричних двигунів транспортувального засоба-шатла.

Спочатку отримаємо диференціальне рівняння відносно кутової швидкості коліс транспортувального засоба-шатла та необхідні для його інтегрування початкові умови у загальному випадку. Для цього розв'яжемо друге співвідношення (2.42) відносно кутової швидкості:

$$\omega = -\frac{L_e}{B_e} \frac{dI}{dt} - \frac{R_e}{B_e} I + \frac{U_e(t)}{B_e}. \quad (2.56)$$

Далі підставимо вираз (2.56) до першого диференціального рівняння (2.42) та після виконання тотожних перетворень в результаті матимемо таке:

$$\frac{L_e J}{B_e} \frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R_e J}{B_e} \frac{dI}{dt} + M \left(-\frac{L_e}{B_e} \frac{dI}{dt} - \frac{R_e}{B_e} I + \frac{U_e(t)}{B_e}, I \right) = \frac{J}{B_e} \frac{dU_e}{dt}. \quad (2.57)$$

Диференціальне рівняння (2.57) струму роторів електричних двигунів транспортувального засоба-шатла слід розглядати із двома початковими

умовами, одне із яких – це друга умова (2.43), а друге визначає похідну струму в початковий момент із першої умови (2.43) та співвідношення (2.56):

$$I(t_0) = I_0, \quad \frac{dI}{dt}(t_0) = \frac{U_e(t_0)}{L_e} - \frac{R_e}{L_e} I_0 - \frac{B_e}{L_e} \omega_0. \quad (2.58)$$

Таким чином, маємо нелінійне звичайне диференціальне рівняння другого порядку (2.57) із двома початковими умовами (2.58), яке дозволяє визначити струм в обмотуванні ротору рушійних електричних двигунів (2.41) транспортувального засобу-шатла.

Визначений шляхом розв'язування задачі (2.57), (2.58) струм дозволить за допомогою співвідношення (2.56) визначити кутову швидкість коліс транспортувального засобу-шатла. Таким чином, математична модель (2.56)–(2.58) еквівалентна отриманій раніше математичній моделі (2.42)–(2.44). Переваги математичної моделі (2.56)–(2.58) обумовлені можливістю визначати електричний струм в обмотуванні роторів рушійних електричних двигунів окремо від кутової швидкості коліс.

Диференціальне рівняння (2.57) є досить складним для дослідження через нелінійність виразу (2.44) для еквівалентного обертового моменту. За умов (2.46) для виконання певних досліджень транспортувального засобу-шатла замість загального виразу (2.44) зручно використовувати лінеаризований вираз (2.47), завдяки якому маємо диференціальне рівняння (2.57) у вигляді:

$$\frac{L_e J}{B_e} \frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R_e J}{B_e} \frac{dI}{dt} - B \left(-\frac{L_e}{B_e} \frac{dI}{dt} - \frac{R_e}{B_e} I + \frac{U_e(t)}{B_e} \right) + 2B_e I - mg\delta = \frac{J}{B_e} \frac{dU_e}{dt}. \quad (2.59)$$

Тотожні перетворення співвідношення (2.59) за рахунок врахування подібних доданків приведуть до такого результату:

$$\frac{L_e J}{B_e} \frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R_e J + L_e B}{B_e} \frac{dI}{dt} + \left(\frac{R_e B}{B_e} + 2B_e \right) I = \frac{J}{B_e} \frac{dU_e}{dt} + \frac{B}{B_e} U_e + mg\delta. \quad (2.60)$$

За умов (2.46) замість нелінійного диференціального рівняння (2.50) із початковими умовами (2.51) можемо розглядати лінійне диференціальне рівняння зі сталими коефіцієнтами (2.60) із початковими умовами (2.58).

Таким чином, систему двох диференціальних рівнянь (2.40), (2.37), (2.29) другого порядку та відповідних їм початкових умов (2.30) можна зводити до встановленого вигляду, що дозволить спростити їхнє використання для обґрунтування інженерних рішень, щодо проектування систем автоматизації нового покоління для автоматичних транспортувальних засобів-шатлів в складській логістиці.

2.4 Дослідження електромеханічних процесів в транспортувальному засобі-шатлі

Різноманіття процесів в транспортувальному засобі-шатлі, як і в будь-якій іншій технічній системі, взагалі можна поділити на два різновиди, а саме – на усталені та перехідні процеси. Це спрощує дослідження, оскільки для оцінки притаманних автоматичному транспортувальному засобу-шатлу властивостей насправді достатньо дослідити лише характерні усталені та перехідні процеси.

2.4.1 Дослідження усталених процесів в транспортувальному засобі-шатлі

Взагалі, усталеними процесами прийнято вважати такі процеси, що відбуваються із сталою швидкістю, або із швидкістю, яка досить близька до сталої. В транспортувальному засобі-шатлі усталені процеси маємо при перевезенні вантажів із заданою сталою швидкістю, яка обмежується різними

умовами, у тому числі міцністю деталей конструкцій самого транспортувального засоба-шатла і логістичних систем, та властивостями вантажів для усунення пошкоджень.

Загальноприйняте поняття про усталений процес з урахуванням співвідношень (2.41) відповідно прийнятій схематизації (див. рис. 2.2) приводить до рівностей:

$$\omega = \omega^{(st)}, I = I^{(st)}, \quad (2.61)$$

де $\omega^{(st)} = const$ та $I^{(st)} = const$ – усталені значення кутової швидкості коліс та сили струму ротору електричного двигуна транспортувального засобу-шатла.

Завдяки прийнятим значенням (2.61) диференціальні рівняння (2.42) математичної моделі транспортувального засоба-шатла набудуть вигляду:

$$M(\omega^{(st)}, I^{(st)}) = 0, -B_e \omega^{(st)} - R_e I^{(st)} + U_e(t) = 0. \quad (2.62)$$

Із другого співвідношення (2.62) маємо, що усталений процес транспортувального засоба-шатла можливий за сталої напруги живлення електричних двигунів:

$$U_e(t) = U_e^{(st)}, U_e^{(st)} = B_e \omega^{(st)} + R_e I^{(st)}, \quad (2.63)$$

де $U_e^{(st)} = const$ – стале значення живильної напруги електричних двигунів транспортувального засобу-шатла, відповідне усталеному режиму (2.61).

З урахуванням співвідношення (2.63) у вигляді (2.62) маємо дві умови, що зв'язують три параметра, а саме – величини $\omega^{(st)}$, $I^{(st)}$ та $U_e^{(st)}$. Для заданої однієї із величин $\omega^{(st)}$, $I^{(st)}$ та $U_e^{(st)}$ співвідношення (2.62) можна розглядати

як систему рівнянь для визначення двох інших незаданих із означених величин. Найбільш цікавим, є визначення величин $\omega^{(st)}$ та $I^{(st)}$, відповідних заданій величині $U_e^{(st)}$. Щоб встановити таку залежність, розглядаємо випадок усталеного режиму транспортувального засобу-шатла, відповідний таким введеним у співвідношеннях (2.61) усталеним значенням:

$$\omega^{(st)} > 0, I^{(st)} > 0. \quad (2.64)$$

З урахуванням прийнятих значень (2.64), використовуємо лінеаризований вираз (2.44) узагальненого механічного обертального моменту та з урахуванням значення (2.63) для заданої величини $U_e^{(st)}$ маємо співвідношення (2.62) у вигляді лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} -B\omega^{(st)} + 2B_e I^{(st)} = mg\delta, \\ B_e \omega^{(st)} + R_e I^{(st)} = U_e^{(st)}. \end{cases} \quad (2.65)$$

Розв'язок системи лінійних алгебраїчних рівнянь (2.65) запишемо так:

$$\omega^{(st)} = \frac{\begin{vmatrix} mg\delta & 2B_e \\ U_e^{(st)} & R_e \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -B & 2B_e \\ B_e & R_e \end{vmatrix}}, \quad I^{(st)} = \frac{\begin{vmatrix} -B & mg\delta \\ B_e & U_e^{(st)} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -B & 2B_e \\ B_e & R_e \end{vmatrix}}. \quad (2.66)$$

Обчислення визначників у виразах (2.66) приведуть до такого результату:

$$\omega^{(st)} = \frac{2B_e U_e^{(st)} - R_e mg\delta}{R_e B + 2B_e^2}, \quad I^{(st)} = \frac{B U_e^{(st)} + B_e mg\delta}{R_e B + 2B_e^2}. \quad (2.67)$$

Вирази (2.67) дозволяють визначати усталену кутову швидкість коліс та силу струму в обмотуваннях роторів у залежності від поданої сталої напруги живлення електричних двигунів транспортувального засобу-шатла. Для подальшого встановлення властивостей усталених процесів використовуємо співвідношення (2.67) та введемо такі позначення:

$$a_{\omega} = \frac{R_e mg \delta}{R_e B + 2B_e^2}, \quad b_{\omega} = \frac{2B_e}{R_e B + 2B_e^2}, \quad (2.68)$$

$$a_I = \frac{B_e mg \delta}{R_e B + 2B_e^2}, \quad b_I = \frac{B}{R_e B + 2B_e^2}. \quad (2.69)$$

Завдяки позначенням (2.68) та (2.69) представимо вирази (2.67) у формі:

$$\omega^{(st)} = -a_{\omega} + b_{\omega} U_e^{(st)}, \quad (2.70)$$

$$I^{(st)} = a_I + b_I U_e^{(st)}. \quad (2.71)$$

Отримані результати (2.70) та (2.71) свідчать, що у випадку (2.64) маємо лінійні залежності між значеннями сталих $\omega^{(st)}$ й $I^{(st)}$, які визначають усталений процес (2.61), та значенням $U_e^{(st)}$ електричної напруги живлення електричних двигунів транспортувального засоба-шатла (рис. 2.3). Кути нахилу прямих, які відображають лінійні залежності (2.70) та (2.71), визначаються виключно введеним у виразах (2.68), (2.69) величинами b_{ω} та b_I , які не залежать від тертя кочення, а залежать лише від величини активного опору обмотування роторів та електромеханічної характеристики електричних двигунів, а також від узагальненого параметру в'язкого опору транспортувального засобу-шатла. Величини a_{ω} та a_I , якими визначається зсув прямих (рис. 2.3), які представляють лінійні залежності (2.70) та (2.71), залежать не тільки від величин активного опору обмотування роторів,

електромеханічної характеристики електричних двигунів, узагальненого параметру в'язкого опору, а також й від ваги та коефіцієнту тертя кочення коліс транспортувального засоба-шатла (див. рис. 2.2). Слід зазначити, що лінійні залежності (2.70), (2.71) можна використовувати лише для значень $\omega^{(st)}$ та $I^{(st)}$ вигляду (2.64). З урахуванням означеної обставини, перша нерівність (2.64) та вираз (2.67) із додатними значеннями параметрів $R_e > 0$, $B_e > 0$ та $B > 0$ дозволять отримати, що залежності (2.70) та (2.71) можна використовувати для напруги живлення:

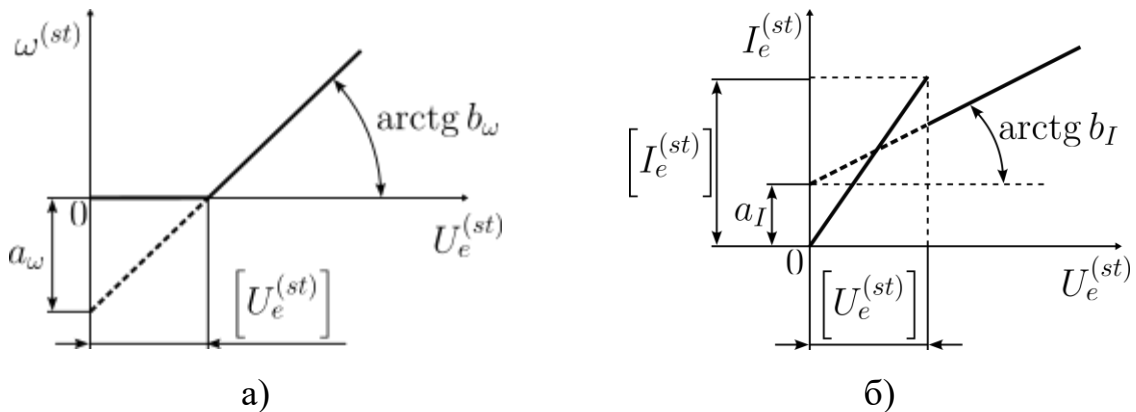


Рисунок 2.3 – Усталені процеси для додатних кутової швидкості коліс (а) та сили струму обмотування ротору рушійних електричних двигунів (б) транспортувального засоба-шатла для внутрішньо-складського транспортування

$$U_e^{(st)} > [U_e^{(st)}], \quad [U_e^{(st)}] > \frac{R_e mg \delta}{2B_e}, \quad (2.72)$$

де $[U_e^{(st)}]$ – напруга живлення, відповідна рівновазі між електромагнітним моментом та моментом тертя кочення коліс транспортувального засобу-шатла.

Напрузі (2.72) електричних двигунів відповідають значення (2.64):

$$U_e^{(st)} > [U_e^{(st)}] \Rightarrow \omega^{(st)} > 0, I^{(st)} > [I^{(st)}], \quad (2.73)$$

$$[I_e^{(st)}] = \frac{mg\delta}{2B_e}, \quad (2.74)$$

де $[I_e^{(st)}]$ – електричний струм ротору електричних двигунів транспортувального засобу-шатла, відповідний рівновазі між моментом тертя кочення коліс та електромагнітним моментом.

У випадку, коли електрична напруга живлення не задовольняє умові (2.72) для сталих $\omega^{(st)}$ та $I^{(st)}$ з урахуванням другого рівняння (2.65) маємо:

$$0 \leq U_e^{(st)} \leq [U_e^{(st)}] \Rightarrow \omega^{(st)} = 0, I^{(st)} = R_e U_e^{(st)}. \quad (2.75)$$

Завдяки співвідношенням (2.73)– (2.75) маємо, що залежності значень сталих $\omega^{(st)}$ та $I^{(st)}$ від величини електричної напруги живлення $U_e^{(st)}$ рушійних електричних двигунів транспортувального засоба-шатла є кусочно-лінійними:

$$\omega^{(st)} = \begin{cases} 0, & 0 \leq U_e^{(st)} \leq [U_e^{(st)}], \\ -a_\omega + b_\omega U_e^{(st)}, & U_e^{(st)} > [U_e^{(st)}], \end{cases} \quad (2.76)$$

$$I^{(st)} = \begin{cases} U_e^{(st)} / R_e, & 0 \leq U_e^{(st)} \leq [U_e^{(st)}], \\ a_I + b_I U_e^{(st)}, & U_e^{(st)} > [U_e^{(st)}]. \end{cases} \quad (2.77)$$

Завдяки отриманим результатам (2.72), (2.76) бачимо (див. рис. 2.3 а), що введений у вигляді (2.68) параметр a_ω характеризує вплив тертя кочення

коліс на введене в нерівності (2.72) граничне значення $[U_e^{(st)}]$ напруги живлення електричних двигунів, яке забезпечує зрушення транспортувального засоба-шатла з міста із нерухомого стану. Результат (2.77) свідчить, що параметр a_l характеризує вплив тертя кочення коліс на введене у виразі (2.74) граничне значення $[I_e^{(st)}]$ (див. рис. 2.3 б) струму в обмотуванні роторів електричних двигунів, при якому забезпечується зрушення транспортувального засоба-шатла з міста із нерухомого стану. Значення a_ω та a_l визначають частину потужності електричних двигунів транспортувального засобу-шатла, яка витрачається на подолання тертя опору упродовж руху:

$$w_\delta = \frac{R_e}{4B_e^2} (mg)^2 \delta^2, \quad (2.78)$$

де w_δ – потужність електричних двигунів, що витрачається на подолання тертя опору коліс транспортувального засобу-шатла.

Результати (2.76) та (2.77) та їхня графічна інтерпретація охоплюють випадки невід'ємних значень сталих $\omega^{(st)}$, $I^{(st)}$, та $U_e^{(st)}$, але їх можна узагальнити на випадки від'ємних значень. Завдяки результатам (2.76), (2.77), у загальному випадку матимемо такі залежності між значеннями сталих $\omega^{(st)}$ й $I^{(st)}$, які визначають усталений процес (2.61), та значенням $U_e^{(st)}$ напруги живлення електричних двигунів транспортувального засоба-шатла (рис. 2.4):

$$\omega^{(st)} = \begin{cases} 0, & |U_e^{(st)}| \leq [U_e^{(st)}], \\ -a_\omega + b_\omega U_e^{(st)}, & U_e^{(st)} > [U_e^{(st)}], \\ a_\omega + b_\omega U_e^{(st)}, & U_e^{(st)} < -[U_e^{(st)}], \end{cases} \quad (2.79)$$

$$I^{(st)} = \begin{cases} U_e^{(st)} / R_e, & |U_e^{(st)}| \leq [U_e^{(st)}], \\ a_I + b_I U_e^{(st)}, & U_e^{(st)} > [U_e^{(st)}], \\ -a_I + b_I U_e^{(st)}, & U_e^{(st)} < -[U_e^{(st)}]. \end{cases} \quad (2.80)$$

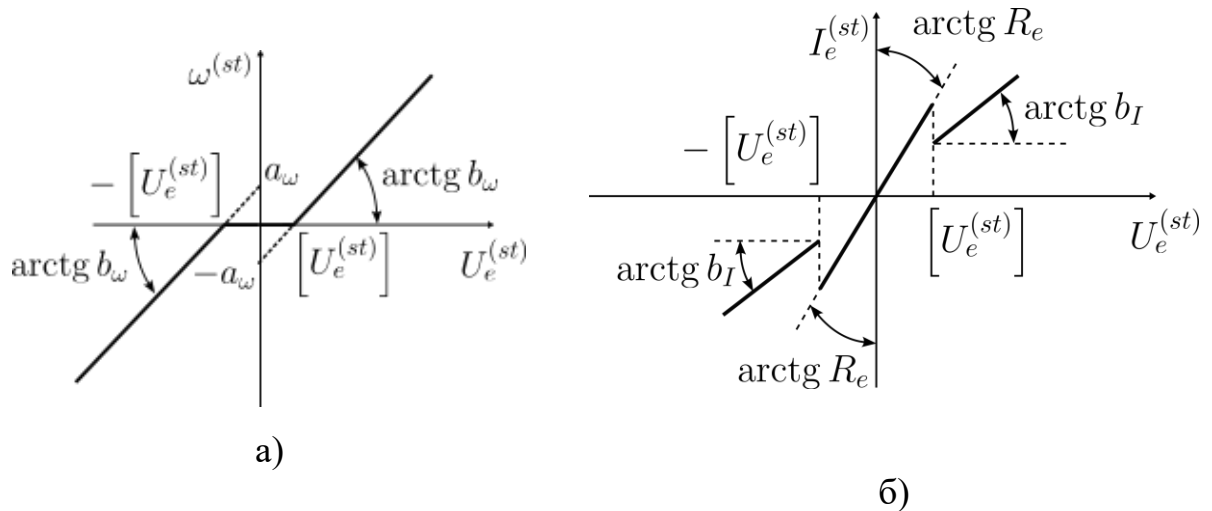


Рисунок 2.4 – Усталені процеси кутової швидкості коліс (а) та сили струму обмотування ротору рушійних електричних двигунів (б) транспортувального засоба-шатла для внутрішньо-складського транспортування

Графічна ілюстрація (рис. 2.4) співвідношень (2.79) та (2.80) показує суттєву нелінійність процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі та обмежені можливості щодо лінеаризації.

Таким чином, завдяки співвідношенням (2.72), (2.69) та (2.68) бачимо, що лише за відсутності тертя кочення, тобто коли $\delta = 0$, залежності (2.79) та (2.80) будуть лінійними, та не буде зайвого витрачання потужності (2.78) електричних двигунів, що слід враховувати при проектуванні систем автоматизації автоматичних транспортувальних засобів-шатлів.

2.4.2 Дослідження перехідних процесів в транспортувальному засобі-шатлі

Взагалі, перехідними процесами прийнято вважати такі процеси, що відбуваються із несталою швидкістю, яку навіть наближено неможливо розглядати як сталу. В транспортувального засобі-шатлі (див. рис. 2.2) перехідні процеси відбуваються зазвичай на режимах роботи, відповідних зміні швидкості руху при транспортуванні вантажів, і такі режими обмежуються різними умовами, у тому числі міцністю деталей транспортувального засоба-шатла та конструкцій логістичних систем, а також уникненню пошкоджень вантажів.

Перехідні процеси в транспортувального засоба-шатла розглядаємо тут як процеси, що відбуваються протягом заміни поточного усталеного процесу на інший новий усталений процес, та розглядаємо цей поточний та новий усталений процес відповідними двом різним значенням швидкості руху транспортувального засоба-шатла. Завдяки співвідношенням (2.8) та (2.79), (2.80) маємо можливість ототожнювати відповідні різним швидкостям усталені процеси в транспортувальному засобі-шатлі із різними значеннями напруги живлення електричних двигунів. Перехідні процеси в транспортувальному засобі-шатлі, можна уявляти як процеси, які відбуваються протягом заміни поточного усталеного стану, відповідного заданому значенню поточної напруги живлення, іншим новим усталеним станом, відповідним іншому новому заданому значенню напруги живлення електричних двигунів. За означених тут обставин будемо розглядати далі перехідні процеси в транспортувальному засобі-шатлі, як такі процеси, що відбуваються внаслідок зміни величини електричної напруги живлення електричних двигунів від заданого поточного до заданого нового значення.

Зрозуміло, що характер перехідних процесів в транспортувальному засобі-шатлі, залежить від закону зміни у часі напруги живлення електричних двигунів при її зміні від заданого поточного до заданого нового

значення. Для формування загальної уяви про характерні властивості перехідних процесів в транспортувальному засобі-шатлі достатньо розглянути процеси, що відповідають миттєвій зміні напруги живлення електричних двигунів від одного сталого значення до іншого сталого значення:

$$U_e(t) = U_{e(cur)}^{(st)} + \left(U_{e(new)}^{(st)} - U_{e(cur)}^{(st)} \right) \eta(t - t_{tr}), \quad (2.81)$$

де $U_{e(cur)}^{(st)}$ та $U_{e(new)}^{(st)}$ – задані початкове та нове значення електричної напруги живлення електричних двигунів, відповідні поточному та новому усталеним станам транспортувального засоба-шатла; $\eta(t)$ – східчаста функція, що має розрив першого роду при $t = 0$; t_{tr} – момент часу, відповідний миттєвій зміні напрузі живлення електричних двигунів, відповідний початку перехідного процесу.

Для різних значень, які визначають напругу (2.81) маємо різні перехідні процеси в транспортувальному засобі-шатлі, але для дослідження найбільш загальних характерних властивостей цих процесів достатньо розглянути перехідні процеси, відповідні такій напрузі живлення (2.81):

$$U_{e(cur)}^{(st)} = 0; \quad t_{tr} = 0, \quad U_{e(new)}^{(st)} > \left[U_e^{(st)} \right], \quad (2.82)$$

Для вихідних даних (2.82) можемо використати будь-яку лінеаризовану модель транспортувального засобу-шатла, але зручною є модель (2.54), (2.55). З урахуванням виразу (2.81), значень (2.82) введемо позначення:

$$n = \frac{L_e B + R_e J}{2L_e J}, \quad \Omega^2 = \frac{R_e B + 2B_e^2}{L_e J}, \quad f = \frac{2B_e}{L_e J} U_{e(new)}^{(st)} - \frac{R_e}{L_e J} mg\delta. \quad (2.83)$$

В початкових умовах (2.55) приймемо такі значення:

$$t_0 = 0, \omega_0 = 0, I_0 = 0. \quad (2.84)$$

З урахуванням позначень (2.83) та початкових значень (2.84) математична модель (2.54), (2.55) набуде такого вигляду:

$$\frac{d^2\omega}{dt^2} + 2n\frac{d\omega}{dt} + \Omega^2\omega = f, \quad \omega(0) = 0, \quad \frac{d\omega}{dt}(0) = 0. \quad (2.85)$$

У вигляді (2.85) маємо математичну модель перехідного процесу, який відбувається в транспортувальному засобі-шатлі, що зрушується із первинно нерухомого стану за рахунок сталої напруги живлення електричних двигунів. Розв'язок лінійного неоднорідного звичайного диференціального рівняння зі сталими коефіцієнтами (2.85) може бути представленим у такому вигляді:

$$\omega(t) = \omega_{\text{одн}}(t) + \omega_{\text{част}}(t), \quad (2.86)$$

де $\omega_{\text{одн}}(t)$ – загальний розв'язок однорідного рівняння, яке співпадає із розв'язуванним диференціальним рівнянням (2.85) з $f = 0$; $\omega_{\text{част}}(t)$ – будь-який частинний розв'язок розв'язуваного неоднорідного рівняння (2.85).

Введений у виразі (2.86) частинний розв'язок $\omega_{\text{част}}(t)$ неоднорідного диференціального рівняння (2.85) може бути запропонований у вигляді:

$$\omega_{\text{част}}(t) = \frac{f}{\Omega^2}. \quad (2.87)$$

Введений у виразі (2.86) загальний розв'язок $\omega_{\text{одн}}(t)$ однорідного рівняння (2.85) визначається коренями відповідного однорідного диференціального рівняння (2.85) характеристичного рівняння, яке має такий вигляд:

$$\lambda^2 + 2n\lambda + \Omega^2 = 0, \quad (2.88)$$

де λ – характеристичний корінь.

Два корені характеристичного рівняння (2.88) записуються так:

$$\lambda_{1,2} = -n \pm \sqrt{n^2 - \Omega^2}. \quad (2.89)$$

Вигляд коренів (2.89) характеристичного рівняння (2.88) істотно впливає на вигляд загального розв'язку $\omega_{\text{одн}}(t)$ однорідного рівняння (2.85). Маємо три характерних випадки, а саме – випадок дійсних некрратних коренів, випадок дійсних кратних коренів та випадок комплексно-спряжених коренів. Розглянемо далі перехідні процеси, відповідні означеним трьом випадкам.

Спочатку розглянемо випадок дійсних некрратних коренів (2.89):

$$n > \Omega. \quad (2.90)$$

У випадку (2.90) характеристичні корені є від'ємними та при цьому мають такі абсолютні величини:

$$\Lambda_{1,2} = n \mp \sqrt{n^2 - \Omega^2}. \quad (2.91)$$

Завдяки позначенням (2.91) корені (2.89) характеристичного рівняння:

$$\lambda_{1,2} = -\Lambda_{1,2}. \quad (2.92)$$

Для дійсних некратних характеристичних коренів (2.92) загальний розв'язок (2.86) з урахуванням частинного розв'язку (2.87) буде мати такий вигляд:

$$\omega(t) = C_1 e^{-\Lambda_1 t} + C_2 e^{-\Lambda_2 t} + \frac{f}{\Omega^2}, \quad \frac{d\omega}{dt}(t) = -\Lambda_1 C_1 e^{-\Lambda_1 t} - \Lambda_2 C_2 e^{-\Lambda_2 t}, \quad (2.93)$$

де C_1 та C_2 – сталі інтегрування.

Для визначення сталих інтегрування потрібні початкові умови (2.85):

$$C_1 + C_2 = -\frac{f}{\Omega^2}, \quad \Lambda_1 C_1 + \Lambda_2 C_2 = 0. \quad (2.94)$$

Співвідношення (2.94) можна розглядати як систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно сталих інтегрування, і це приведе до такого результату:

$$C_1 = -\frac{\Lambda_2}{\Lambda_2 - \Lambda_1} \frac{f}{\Omega^2}, \quad C_2 = \frac{\Lambda_1}{\Lambda_2 - \Lambda_1} \frac{f}{\Omega^2}. \quad (2.95)$$

Сталі інтегрування (2.95) та розв'язок (2.93) дозволить отримати таке:

$$\omega(t) = \left(1 - \frac{\Lambda_2}{\Lambda_2 - \Lambda_1} e^{-\Lambda_1 t} + \frac{\Lambda_1}{\Lambda_2 - \Lambda_1} e^{-\Lambda_2 t} \right) \frac{f}{\Omega^2}, \quad (2.96)$$

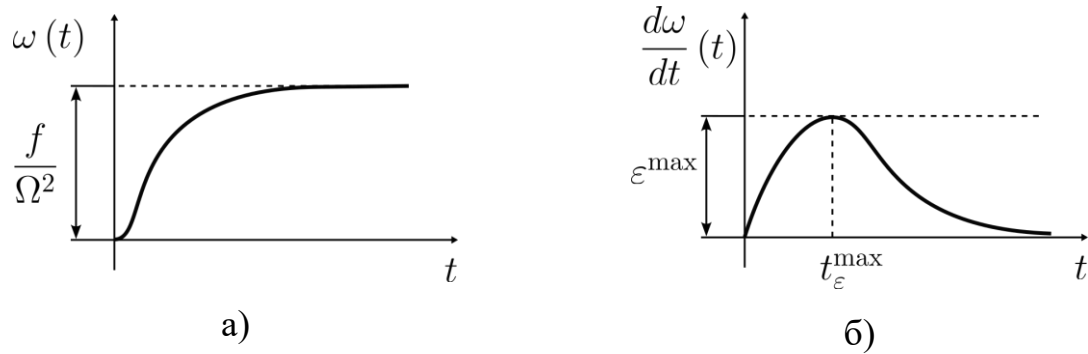


Рисунок 2.5 – Кутова швидкість (а) та кутове прискорення (б) коліс транспортувального засоба-шатла при зрушенні з місця у випадку дійсних коренів характеристичного рівняння

$$\frac{d\omega}{dt}(t) = \frac{\Lambda_1 \Lambda_2}{\Lambda_2 - \Lambda_1} (e^{-\Lambda_1 t} - e^{-\Lambda_2 t}) \frac{f}{\Omega^2}. \quad (2.97)$$

Характерний вигляд розв'язку (2.96), (2.97) представлений на рис. 2.5 та свідчить про поступове збільшення кутової швидкості (2.96) коліс при зрушенні з місця транспортувального засобу-шатла, причому максимальне кутове прискорення (2.97) має місце в деякий момент часу $t = t_\varepsilon^{\max}$. Для визначення цього моменту часу розглянемо похідну кутового прискорення (2.97):

$$\frac{d^2\omega}{dt^2}(t) = \frac{\Lambda_1 \Lambda_2}{\Lambda_2 - \Lambda_1} (\Lambda_2 e^{-\Lambda_2 t} - \Lambda_1 e^{-\Lambda_1 t}) \frac{f}{\Omega^2}. \quad (2.98)$$

Момент часу $t = t_\varepsilon^{\max}$ (рис. 2.5 б) визначається рівністю нулю похідної (2.98):

$$\frac{d^2\omega}{dt^2}(t_\varepsilon^{\max}) = 0 \Rightarrow \Lambda_2 e^{-\Lambda_2 t_\varepsilon^{\max}} - \Lambda_1 e^{-\Lambda_1 t_\varepsilon^{\max}} = 0. \quad (2.99)$$

Розв'язування рівняння (2.99) дозволить отримати такий результат:

$$t_{\varepsilon}^{\max} = \frac{\ln(\Lambda_2/\Lambda_1)}{\Lambda_2 - \Lambda_1}. \quad (2.100)$$

Завдяки результату (2.100) та виразу (2.97) максимальне кутове прискорення:

$$\varepsilon^{\max} = \frac{\Lambda_1\Lambda_2}{\Lambda_2 - \Lambda_1} \left(e^{-\Lambda_1 \frac{\ln(\Lambda_2/\Lambda_1)}{\Lambda_2 - \Lambda_1}} - e^{-\Lambda_2 \frac{\ln(\Lambda_2/\Lambda_1)}{\Lambda_2 - \Lambda_1}} \right) \frac{f}{\Omega^2}, \quad (2.101)$$

де ε^{\max} – максимальне прискорення коліс транспортувального засоба-шатла при зрушенні з місця.

Бачимо (див. рис. 2.5), що перехідним процесам у випадку дійсних некратних коренів характеристичного рівняння притаманна монотонна зміна кутової швидкості коліс від поточного до нового усталеного значення.

Далі розглянемо випадок дійсних некратних коренів (2.89):

$$n = \Omega. \quad (2.102)$$

У випадку (2.102) характеристичні корені (2.89) є від'ємними:

$$\Lambda_{1,2} = n. \quad (2.103)$$

Для дійсних кратних характеристичних коренів (2.92), (2.103) загальний розв'язок (2.86) з урахуванням частинного розв'язку (2.87) має такий вигляд:

$$\omega(t) = C_1 e^{-nt} + C_2 t e^{-nt} + \frac{f}{\Omega^2}, \quad \frac{d\omega}{dt}(t) = -nC_1 e^{-nt} - nC_2 t e^{-nt} + C_2 e^{-nt}, \quad (2.104)$$

де C_1 та C_2 – сталі інтегрування.

Для визначення сталих інтегрування в розв'язку (2.87) використовуємо початкові умови із (2.85), які приведуть до співвідношень:

$$C_1 + \frac{f}{\Omega^2} = 0, \quad -nC_1 + C_2 = 0. \quad (2.105)$$

Співвідношення (2.105) розглядаємо як лінійні алгебраїчні рівняння:

$$C_1 = -\frac{f}{\Omega^2}, \quad C_2 = -n\frac{f}{\Omega^2}. \quad (2.106)$$

Сталі інтегрування (2.106) та розв'язок (2.104) дозволять отримати:

$$\omega(t) = \frac{f}{\Omega^2} (1 - (1 + nt)e^{-nt}), \quad (2.107)$$

$$\frac{d\omega}{dt}(t) = \frac{f}{\Omega^2} n^2 t e^{-nt}. \quad (2.108)$$

Вигляд розв'язку (2.107), (2.108) представлений на рис. 2.5 та свідчить про поступове збільшення кутової швидкості (2.107) коліс при зрушенні з місця транспортувального засобу-шатла, причому максимальне кутове прискорення (2.108) має місце в деякий момент часу $t = t_{\varepsilon}^{\max}$. Для визначення цього моменту часу розглянемо похідну кутового прискорення (2.108):

$$\frac{d^2\omega}{dt^2}(t) = \frac{f}{\Omega^2} n^2 (1 - nt)e^{-nt}. \quad (2.109)$$

Шуканий момент часу $t = t_\varepsilon^{\max}$ (рис. 2.5 б) визначається за допомогою умови рівності нулю похідної (2.109):

$$\frac{d^2\omega}{dt^2}(t_\varepsilon^{\max}) = 0 \Rightarrow 1 - n t_\varepsilon^{\max} = 0. \quad (2.110)$$

Розв'язування рівняння (2.99) дозволить отримати такий результат:

$$t_\varepsilon^{\max} = \frac{1}{n}. \quad (2.111)$$

Завдяки результату (2.111) та виразу (2.108) маємо таке максимальне кутове прискорення коліс транспортувального засоба-шатла:

$$\varepsilon^{\max} = \frac{d\omega}{dt}(t) = \frac{f}{\Omega^2} \frac{n}{e}. \quad (2.112)$$

Отже бачимо (див. рис. 2.5), що перехідним процесам у випадку дійсних кратних коренів характеристичного рівняння притаманна монотонна зміна кутової швидкості коліс транспортувального засоба-шатла від попереднього до нового усталеного значення.

Розглянемо випадок комплексно спряжених коренів (2.89):

$$n < \Omega. \quad (2.113)$$

У випадку (2.113) маємо такі характеристичні корені (2.89):

$$\lambda_{1,2} = -n \pm i\Omega_*, \quad (2.114)$$

де $\Omega_* = \sqrt{\Omega^2 - n^2}$.

Для характеристичних коренів (2.114) загальний розв'язок (2.86) з урахуванням частинного розв'язку (2.87) має такий вигляд:

$$\omega(t) = e^{-nt} (C_1 \sin \Omega_* t + C_2 \cos \Omega_* t) + \frac{f}{\Omega^2},$$

$$\frac{d\omega}{dt}(t) = -ne^{-nt} (C_1 \sin \Omega_* t + C_2 \cos \Omega_* t) + \Omega_* e^{-nt} (C_1 \cos \Omega_* t - C_2 \sin \Omega_* t), \quad (2.115)$$

де C_1 та C_2 – сталі інтегрування.

Для визначення сталих інтегрування у розв'язку вигляду (2.115) використовуємо початкові умови із (2.85), які приведуть до співвідношень:

$$C_2 + \frac{f}{\Omega^2} = 0, \quad \Omega_* C_1 - nC_2 = 0. \quad (2.116)$$

Співвідношення (2.116) розглядаємо як лінійні алгебраїчні рівняння:

$$C_2 = -\frac{f}{\Omega^2}, \quad C_1 = -\frac{n}{\Omega_*} \frac{f}{\Omega^2}. \quad (2.117)$$

Сталі інтегрування (2.117) та розв'язок (2.115) дозволяють отримати таке:

$$\omega(t) = \frac{f}{\Omega^2} \left(1 - e^{-nt} \left(\frac{n}{\Omega_*} \sin \Omega_* t + \cos \Omega_* t \right) \right). \quad (2.118)$$

Характерний вигляд розв'язку (2.118) представлений на рис. 2.6 та свідчить про немонотонне збільшення кутової швидкості (2.118) коліс при зрушенні з місця транспортувального засоба-шатла таким чином, що

відбуваються коливання кутової швидкості навколо її усталеного значення наприкінці перехідного процесу.

Таким чином, (рис. 2.6) перехідним процесам у випадку комплексно спряжених коренів характеристичного рівняння притаманна немонотонна зміна кутової швидкості коліс, що необхідно враховувати при проектуванні систем автоматизації нового покоління автоматичних транспортувальних засобів-шатлів складської логістики.

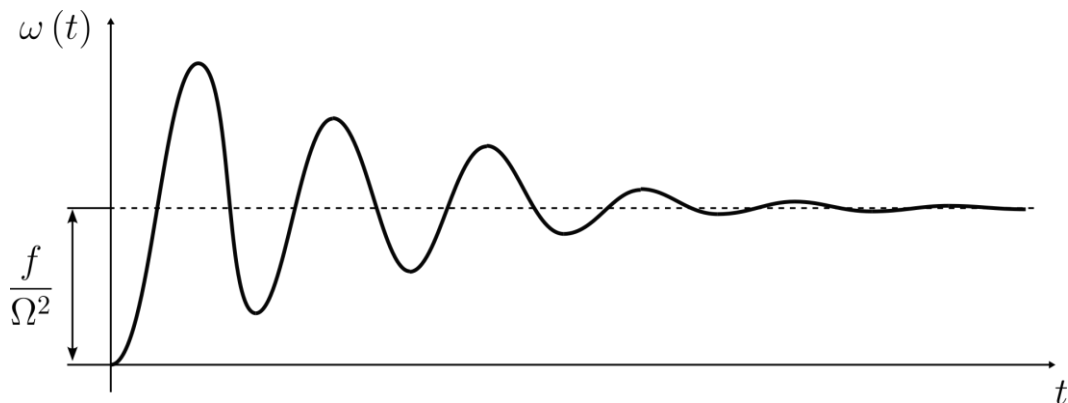


Рисунок 2.6 – Кутова швидкість коліс транспортувального засобу-шатла при зрушенні з місця у випадку комплексно спряжених коренів характеристичного рівняння

2.5 Висновки за другим розділом

На основі огляду конструкції транспортувального засобу-шатлу розроблено його схематизацію у вигляді електромеханічної системи, стан якої визначено кутом повороту коліс та електричним зарядом в обмотуваннях роторів рушійних електричних двигунів.

Математичну модель транспортувального засоба-шатла було побудовано за допомогою рівнянь Лагранжа 2-го роду з використанням електромеханічних аналогій у вигляді системи двох нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку із відповідною кількістю

початкових умов. Показано що нелінійність диференціальних рівнянь математичної моделі є наслідком врахування властивостей сили тертя кочення коліс та встановлено можливості лінеалізації диференціальних рівнянь для дослідження окремих режимів руху.

Було досліджено диференціальні рівняння математичної моделі транспортувального засобу-шатла, та показано що такі диференціальні рівняння можуть бути представлені у трьох еквівалентних формах. Математична модель транспортувального засоба-шатла може бути еквівалентно зведена звичайного диференціального нелінійного рівняння другого порядку відносно кутової швидкості коліс із відповідними початковими умовами. Також можлива еквівалентна форма представлення математичної моделі транспортувального засоба-шатла у вигляді звичайного диференціального рівняння другого порядку відносно сили струму в обмотуванні роторів рушійних електричних двигунів із відповідними початковими умовами.

Дослідження процесів в транспортувального засоба-шатла виконані на основі лінеаризованих математичних моделей. Показано що усталені процеси в транспортувального засоба-шатла характеризуються нелінійною залежністю між усталеним значенням кутової швидкості коліс і сили струму в обмотуванні ротору та живильною напругою рушійних електричних двигунів. Нелінійності між параметрами стану усталених процесів обумовлені властивостями тертя кочення коліс. Встановлено, що перехідні процеси в транспортувального засоба-шатла при його зрушенні з нерухомого стану істотно залежать від вигляду характеристичних коренів лінеаризованого диференціального рівняння математичної моделі. У випадку дійсних коренів маємо монотонне збільшення кутової швидкості від поточного до нового усталеного значення, але при комплексно спряжених коренях характеристичного рівняння таке збільшення є немонотонним.

Таким чином перехідним процесам у випадку комплексно спряжених коренів характеристичного рівняння притаманна немонотонна зміна кутової швидкості коліс, що необхідно враховувати при проєктування систем автоматизації нового покоління автоматичних транспортувальних засобів-шатлів складської логістики.

Перелік використаних джерел у даному розділі наведено у повному списку використаних джерел під номерами [14, 21, 31, 47-77].

Матеріали цього розділу опубліковано в роботах автора: [1, 2, 3, 5, 7, 8, 9, 13, 16, 17], що наведено в додатку II.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТУВАЛЬНОГО ЗАСОБУ-ШАТЛА

3.1 Автоматичне регулювання швидкості транспортувального засоба-шатла ПІД-регулятором

Автоматичне керування транспортувальним-засобом шатлом має забезпечувати стабільність заданих усталених станів а також належний перехід від одного усталеного стану до іншого усталеного стану [21, 31, 53, 56]. Основною перешкодою стабільності усталених станів є різноманітні неконтрольовані випадкові збурення різного походження, що впливають на транспортувальний засіб-шатл. Забезпеченню саме заданих усталених станів істотно перешкоджають також невизначені заздалегідь умови експлуатації, у першу чергу змінна маса транспортованого вантажу. При переході від деякого поточного усталеного стану до іншого бажаного заданого усталеного стану, зрозуміло слід забезпечити в результаті саме бажаний заданий усталений стан, а не певно відхилений від нього інший усталений стан.

Технології ПІД-регуляторів є досить гарно вивченими та надійними завдяки існуючому широкому досвіду їхнього використання щодо автоматизованого керування різноманітними технічними системами [78-84]. З рахуванням цієї обставини бажано передбачити можливість використання ПІД-регуляторів щодо керування автоматизованими транспортувальними засобами-шатлами, але обґрунтування таких можливостей має бути відповідним чином досліджене, щоб визначити застосування цих регуляторів та запропонувати належні способи підбору їхніх параметрів. Оскільки, неможливо передбачити усі можливості щодо застосування ПІД-регуляторів щодо автоматичного керування процесами в транспортувальному засоби-

шатлі, далі зосередимося лише на найбільш важливих питаннях щодо стабілізації швидкості прямолінійного руху транспортування вантажів, а також щодо автоматичного позиціювання транспортувального засоба-шатлу відносно складників логістичних систем.

3.1.1 Математична модель керування швидкістю транспортування вантажів

Швидкість прямолінійного руху шатла (див. рис. 2.2) при перевезенні вантажів, відповідно до рівняння зв'язку (2.2), до прийнятих узагальнених координат (2.13) та введеного позначення (2.41) визначатиметься так:

$$v(t) = r_w \omega(t), \quad (3.1)$$

де $v(t)$ – швидкість прямолінійного руху транспортувального засобу-шатлу.

Завдяки співвідношенню (3.1) кутова швидкість набуде вигляду:

$$\omega(t) = \frac{v(t)}{r_w}. \quad (3.2)$$

Щоб отримати диференціальне рівняння для швидкості прямолінійного руху транспортувального засобу-шатлу, врахуємо співвідношення (3.2) в математичній моделі (2.54), (2.55), та матимемо в результаті таке:

$$\frac{L_e J}{2B_e r_w} \frac{d^2 v}{dt^2} + \frac{L_e B + R_e J}{2B_e r_w} \frac{dv}{dt} + \frac{R_e B + 2B_e^2}{2B_e r_w} v = U_e(t) - \frac{R_e}{2B_e} mg\delta, \quad (3.3)$$

$$v(t_0) = \omega_0 r_w, \quad \frac{dv}{dt}(t_0) = \frac{2B_e r_w}{J} I_0 - \frac{r_w B}{J} \omega_0 - \frac{r_w mg\delta}{J}. \quad (3.4)$$

Для спрощення подальшого викладення зручно ввести такі позначення:

$$a_2 = \frac{L_e J}{2B_e r_w}, \quad a_1 = \frac{L_e B + R_e J}{2B_e r_w}, \quad a_0 = \frac{R_e B + 2B_e^2}{2B_e r_w}, \quad f(t) = U_e(t) - \frac{R_e}{2B_e} mg\delta, \quad (3.5)$$

де a_2 , a_1 та a_0 – параметри математичної моделі керування швидкістю транспортування вантажів; $U(t)$ – функція, що визначає зовнішні впливи на транспортувальний засіб-шатл при перевезенні вантажу.

Завдяки позначенням (3.5) диференціальне рівняння (3.3) буде таким:

$$a_2 \frac{d^2 v}{dt^2} + a_1 \frac{dv}{dt} + a_0 v = f(t). \quad (3.6)$$

Математичну модель процесу транспортування вантажів маємо у вигляді диференціального рівняння (3.6) та початкових умов (3.4). Швидкість $v = v(t)$ прямолінійного руху транспортувального засобу-шатлу розглядаємо як керований параметр, а допоміжна величина $f(t)$, що введена в останньому виразі (3.5), характеризує керування, за рахунок якого має забезпечуватися стан транспортувального засоба-шатла при його експлуатації та зовнішні впливи й умови експлуатації. До зовнішніх впливів та умов експлуатації відносяться значення δ коефіцієнту тертя кочення коліс та величина m повної маси засобу-шатла, а до керування відноситься напруга $U_e(t)$ живлення електричних двигунів [58, 85-90].

Забезпечення заданої швидкості прямолінійного руху перевезення вантажів засобом-шатлом фактично зводиться до задовольняння рівності:

$$v(t) = v_w, \quad (3.7)$$

де $v_w = const$ – задане значення бажаної швидкості прямолінійного руху транспортувального засоба-шатла при експлуатації.

Практично неможливо точно задовольнити рівність (3.7), тому задовольнення рівності (3.7) зводиться до зменшення розбіжності між поточним значенням $v(t)$ та заданим бажаним значенням v_w швидкості прямолінійного руху транспортувального засоба-шатла [57, 85-90]:

$$x(t) = v(t) - v_w, \quad (3.8)$$

де $x(t)$ – величина розбіжності між поточним та заданим бажаним значеннями швидкості прямолінійного руху транспортувального засобу-шатла.

Завдяки співвідношенню (3.8) можемо визначити швидкість:

$$v(t) = x(t) + v_w. \quad (3.9)$$

З урахуванням представленої у вигляді (3.9) швидкості транспортувального засоба-шатла та диференціального рівняння (3.6) ведемо до розгляду величину:

$$u(t) = f(t) - a_0 v_w, \quad (3.10)$$

де $u(t)$ – керування транспортувального засобу-шатла.

Завдяки співвідношенням (3.9) та (3.10) диференціальне рівняння (3.6) та початкові умови (3.4) набудуть такого вигляду:

$$a_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = u(t), \quad (3.11)$$

$$x(t_0) = \omega_0 r_w - v_w, \quad \frac{dx}{dt}(t_0) = \frac{2B_e r_w}{J} I_0 - \frac{r_w B}{J} \omega_0 - \frac{r_w mg \delta}{J}. \quad (3.12)$$

У дослідженнях щодо питань автоматизації процесів стабілізації швидкості руху транспортувального засоба-шатла розглядатимемо такі початкові значення:

$$\omega_0 = \frac{v_w}{r_w}, \quad I_0 = \frac{mg \delta + B(v_w/r_w)}{2B_e}. \quad (3.13)$$

Початкові значення, прийняті у вигляді (3.12), відповідають бажаному стану транспортувального засобу-шатла, для якого початкові умови (3.11) мають вигляд:

$$x(t_0) = 0, \quad \frac{dx}{dt}(t_0) = 0. \quad (3.14)$$

У вигляді (3.11), (3.14) маємо математичну модель процесу керування швидкістю руху транспортувального засобу-шатла. Введене у вигляді (3.10) керування [90] з урахуванням останнього співвідношення (3.5) має вигляд:

$$u(t) = U_e(t) - \frac{R_e}{2B_e} mg \delta - a_0 v_w. \quad (3.15)$$

Введене керування (3.15) швидкістю поступального руху транспортувального засоба-шатла визначається напругою живлення рушійних електричних двигунів, а також величиною маси, коефіцієнта тертя

кочення та бажаного значення швидкості руху. Керування швидкістю транспортувального засоба-шатла здійснюється за рахунок вибору електричної напруги живлення $U_e(t)$, а маса транспортувального засоба-шатла та коефіцієнт тертя кочення не можуть бути керованими, та, більш того, насправді неконтрольовано змінюються протягом експлуатації, що можна вважати умовами невизначеності.

3.1.2 Властивості процесів керування швидкістю автоматичного транспортувального засоба-шатлу

Можливості автоматичного керування та регулювання швидкістю перевезення вантажів транспортувальним засобом-шатлом визначаються властивостями транспортувальної швидкості як об'єкту автоматизації. Такі властивості визначаються зв'язком між керуванням (3.15) та відхиленням (3.8) швидкості, який визначається диференціальним рівнянням (3.11). Для подальшого розгляду інженерних задач автоматизації керування швидкістю перевезення вантажів транспортувальним засобом-шатлом з урахуванням вигляду диференціального рівняння (3.11) зручно ввести такі позначення:

$$n = \frac{a_1}{2a_2}, \quad \Omega^2 = \frac{a_0}{a_2}, \quad \beta = \frac{1}{a_2}. \quad (3.16)$$

В якості початкового моменту часу приймемо такий:

$$t_0 = 0. \quad (3.17)$$

З урахуванням позначень (3.16) та прийнятого значення (3.17) математична модель (3.11), (3.15) набуде такого вигляду:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2n\frac{dx}{dt} + \Omega^2x = \beta u(t), \quad x(0) = 0, \quad \frac{dx}{dt}(0) = 0. \quad (3.18)$$

Математична модель швидкості транспортування вантажів як об'єкту автоматизації має вигляд (3.18), і її зручно розглядати у нових змінних, введених за допомогою перетворення Лапласа [91-93]:

$$X(s) = \int_0^{\infty} x(t)e^{-st} dt, \quad U(s) = \int_0^{\infty} u(t)e^{-st} dt, \quad (3.19)$$

де $X(s)$ та $U(s)$ – відображення керованого параметру $x(t)$ та параметру керування $u(t)$; s – комплексна змінна.

Перетворення Лапласа (3.19) та математична модель (3.18) приводять до представлення лінійного об'єкту автоматизації у вигляді динамічної ланки (рис. 3.1) та поняття про передаточну функцію:

$$W(s) = \frac{\beta}{s^2 + 2ns + \Omega^2}. \quad (3.20)$$

де $W(s)$ – передаточна функція процесу керування швидкістю перевезення вантажів транспортувальним засобом-шатлом.

Передаточна функція (3.20) представляє зв'язок між відображеннями (3.19) відповідно диференціальному рівнянню із початковими умовами:

$$X(s) = W(s)U(s). \quad (3.21)$$

Передаточна функція (3.20) містить в собі всі властивості, що притаманні процесу керування швидкістю транспортування.

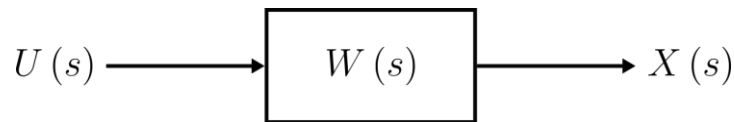


Рисунок 3.1 – Представлення лінійного об'єкту автоматизації за допомогою динамічної ланки

Розглянемо амплітудно-частотну характеристику процесу керування швидкістю транспортувального засобу-шатлу. Для цього врахуємо:

$$s = i\varpi, \quad (3.22)$$

де ϖ – кутова (циклічна) частота гармонічного керування.

Врахуємо вираз (3.22) в передаточній функції (3.20) та матимемо таке:

$$W(i\varpi) = \frac{\beta}{\Omega^2 - \varpi^2 + i2n\varpi}. \quad (3.23)$$

Виконаємо тотожні перетворення виразу (3.23) та отримаємо в результаті:

$$W(i\varpi) = \frac{\Omega^2 - \varpi^2}{(\Omega^2 - \varpi^2)^2 + 4n^2\varpi^2} \beta - i \frac{2n\varpi}{(\Omega^2 - \varpi^2)^2 + 4n^2\varpi^2} \beta. \quad (3.24)$$

Завдяки виразу (3.24) маємо амплітудно-частотну характеристику процесу керування швидкістю перевезення вантажів транспортувальним засобом-шатлом:

$$A(\varpi) = \frac{\beta}{\sqrt{(\Omega^2 - \varpi^2)^2 + 4n^2\varpi^2}}, \quad (3.25)$$

де $A(\omega)$ – амплітуда керованого параметру залежна від частоти керування.

Дослідження амплітудно-частотної характеристики (3.25) зводиться до дослідження властивостей її знаменнику, тобто функції

$$\varphi(\omega) = (\Omega^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2. \quad (3.26)$$

Щоб визначити стаціонарні точки функції (3.26), використаємо її похідні:

$$\frac{d\varphi}{d\omega}(\omega) = -4(\Omega^2 - \omega^2)\omega + 8n^2\omega, \quad (3.27)$$

$$\frac{d^2\varphi}{d\omega^2}(\omega) = 8n^2 - 4\Omega^2 + 12\omega^2. \quad (3.28)$$

Стаціонарні точки функції (3.26) визначаються за допомогою похідної (3.27):

$$-4(\Omega^2 - \omega^2)\omega + 8n^2\omega = 0 \Rightarrow \omega = 0, \quad \omega = \sqrt{\Omega^2 - 2n^2}. \quad (3.29)$$

Друга похідна (3.28) в стаціонарних точках (3.29) має такі значення:

$$\frac{d^2\varphi}{d\omega^2}(0) = 8n^2 - 4\Omega^2, \quad \frac{d^2\varphi}{d\omega^2}(\Omega^2 - 2n^2) = 8\Omega^2 - 16n^2. \quad (3.30)$$

Значення (3.30) приводять до умови

$$2n^2 < \Omega^2. \quad (3.31)$$

З урахуванням вигляду амплітудно-частотної характеристики (3.25) у випадку виконання умови (3.31) для значення $\varpi = 0$ маємо мінімум, а для значення $\varpi = \sqrt{\Omega^2 - 2n^2}$ – відповідно максимум; при невиконанні умови (3.31) для значення $\varpi = 0$ маємо максимум, а значення $\varpi = \sqrt{\Omega^2 - 2n^2}$ буде комплексним; незалежно від цього із амплітудно-частотної характеристики (3.25) також маємо:

$$A(0) = A_0, \quad A\left(\sqrt{\Omega^2 - 2n^2}\right) = A_{\max}, \quad \lim_{\varpi \rightarrow \infty} A(\varpi) = 0. \quad (3.32)$$

де $A_0 = \frac{\beta}{\Omega^2}$ та $A_{\max} = \frac{\beta}{2n^2 \sqrt{\Omega^2 - n^2}}$ – значення амплітудно-частотної характеристики в точках $\varpi = 0$ та $\varpi = \sqrt{\Omega^2 - 2n^2}$.

З урахуванням означених обставин щодо умови (3.31) та характерних значень (3.32), загальний вигляд амплітудно-частотної характеристики процесу керування швидкістю транспортувального засобу-шатлу показаний на рис. 3.2. Бачимо (рис. 3.2) можливість резонансних явищ, які містять потенційну небезпеку аварійних ситуацій протягом експлуатації логістичних систем, що оснащені автономними транспортувальними засобами-шатлами. Така небезпека обумовлена неконтрольованими впливами протягом експлуатації через зміну маси вантажу [94], через зміну коефіцієнта тертя кочення коліс, через збурення в роботі електричних та електронних компонентів систем керування, характерна частота яких може наблизитись до резонансної частоти (рис. 3.2).

Для уникнення потенційних аварійних ситуацій при експлуатації, проектування конструкцій та систем автоматичних транспортувальних засобів-шатлів бажано здійснювати таким чином, щоб уникнути резонансних явищ, і для цього з урахуванням нерівності (3.31) можна рекомендувати таку умову для визначення параметрів конструкцій та систем:

$$2n^2 \geq \Omega^2. \quad (3.33)$$

Завдяки умові (3.33) максимум амплітудно-частотної характеристики (3.25) буде відповідати значенню $\varpi = 0$, та при подальшому збільшенні частоти ϖ амплітудно-частотна характеристика буде монотонно прямувати до нуля. Не завжди можна підібрати параметри конструкцій та систем транспортувального засобу-шатлу відповідно до умов (3.33), але при цьому слід обмежувати величину A_{\max} із співвідношень (3.32) для уникнення потенційних аварійних ситуацій внаслідок резонансних явищ (рис. 3.2).

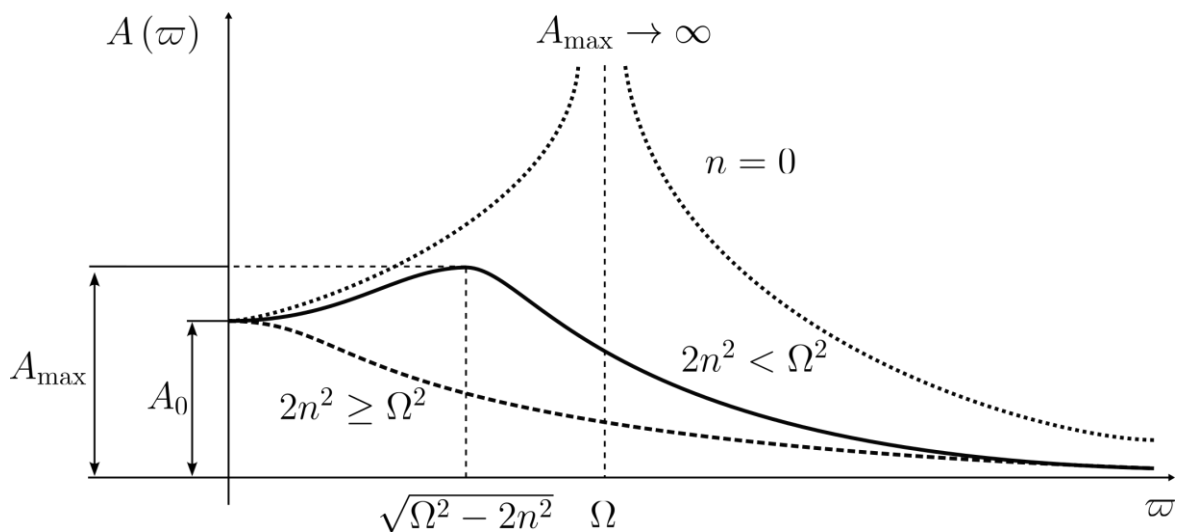


Рисунок 3.2 – Амплітудно-частотна характеристика процесу керування швидкістю транспортувального засобу-шатла

3.1.3 Синтез структурної схеми керування транспортувальним засобом-шатлом

Завдання структурно-алгоритмічної побудови системи керування транспортувальним засобом-шатлом визначається структурою модуля та алгоритмом умов взаємодії його компонентів та положення їх у загальній структурі.

Вирішується задача розробки оптимізаційних процедур, які використовуються у плануванні екстремальних дій. При цьому питання розробки алгоритмічного забезпечення рухом можна розглядати для специфічних аспектів моделювання об'єкта.

Управління рухом транспортувального засобу-шатлу у виробничому просторі зводиться до узгодженого управління швидкостями обертання провідних коліс на основі отриманих даних про поточне положення та кінцеву ціль руху. Для цього швидкість обертання кожного колеса вимірюється датчиком числа обертів.

Кутову орієнтацію робота у локальному просторі визначимо з допомогою загальної системи управління на основі поточних даних про координати розташування мобільного пристрою. В результаті отримуємо загальну функціональна схема системи управління мобільним роботом, що наведена на рисунку 3.3.

На рисунку 3.3 використовуються наступні скорочення: ДП – датчик поточного місцезнаходження; МК – мікроконтролер; П – підсилювач; Дв – двигун; P – редуктор; ДШ – датчик швидкості; ОУ – об'єкт управління.

Керуючий мікроконтролер (МК) виробляє сигнали управління швидкістю обертання кожним із двох електродвигунів Дв. Ці сигнали посилюються за потужністю підсилювачами У. Зазвичай у сучасних цифрових системах управління сигнали управління двигунами використовується широтно-імпульсна модуляція.

Використання широтно-імпульсної модуляції дозволяє суттєво зменшити габарити підсилювачів потужності за рахунок суттєвого збільшення коефіцієнта корисної дії.

Електродвигуни через понижуючі редуктори обертають провідні колеса робота (об'єкта управління ОУ), забезпечуючи його рух.

Швидкість обертання кожного колеса вимірюється оптичним датчиком швидкості ДШ, сигнали від яких поступають на мікроконтролер МК, що управляє рухом мобільного робота. Система управління робота складається з керуючої, виконавчої та вимірювальної частин. Керівна частина реалізується у вигляді програми роботи мікроконтролера МК. Виконавча частина включає підсилювачі потужності У, електродвигуни Дв, редуктори Р та об'єкт управління ОУ.

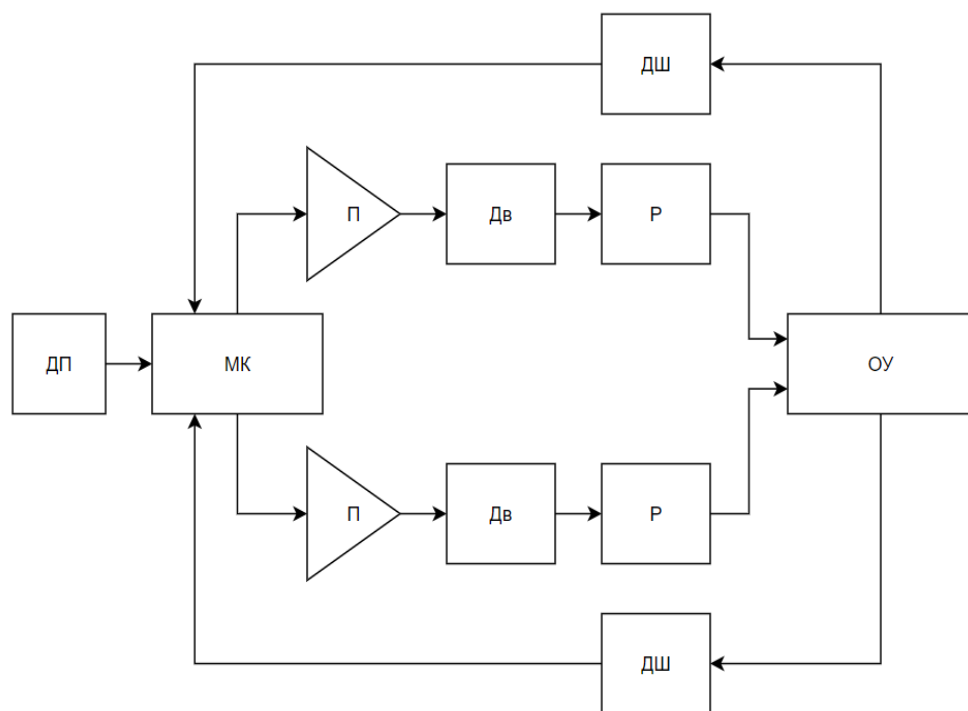


Рисунок 3.3 – Загальна функціональна схема системи керування транспортувального засобу-шатлу у виробничому просторі

Вимірювальна частина складається з датчиків швидкості обертання коліс ДШ та датчика напрямку руху.

Особливості організації системи управління рухом транспортувального засобу-шатлу розглянемо в рамках лінійних моделей першого наближення.

Розглянута задача при прийнятій моделі ОУ полягає у забезпеченні управління швидкістю поздовжнього переміщення $V_{\text{пр}}$ та напрямом руху $\varphi_{\text{р}}$ робота. Для цієї реалізації на вхід керуючої частини повинні надходити задане значення швидкості поздовжнього переміщення $V_{\text{з}}$ робота і заданий напрямок його руху $\varphi_{\text{з}}$. Для замикання системи образними зв'язками від вимірювальної частини повинні надходити виміряні поточні значення $V_{\text{пр}}$ та $\varphi_{\text{р}}$ робота.

Так як робот не має датчика швидкості поздовжнього руху $V_{\text{пр}}$, то поточне значення цієї величини необхідно обчислювати за сигналами датчиків швидкості коліс.

В результаті отримуємо структурну схему системи управління рухом транспортувального засобу-шатлу, що показано рисунку 3.4.

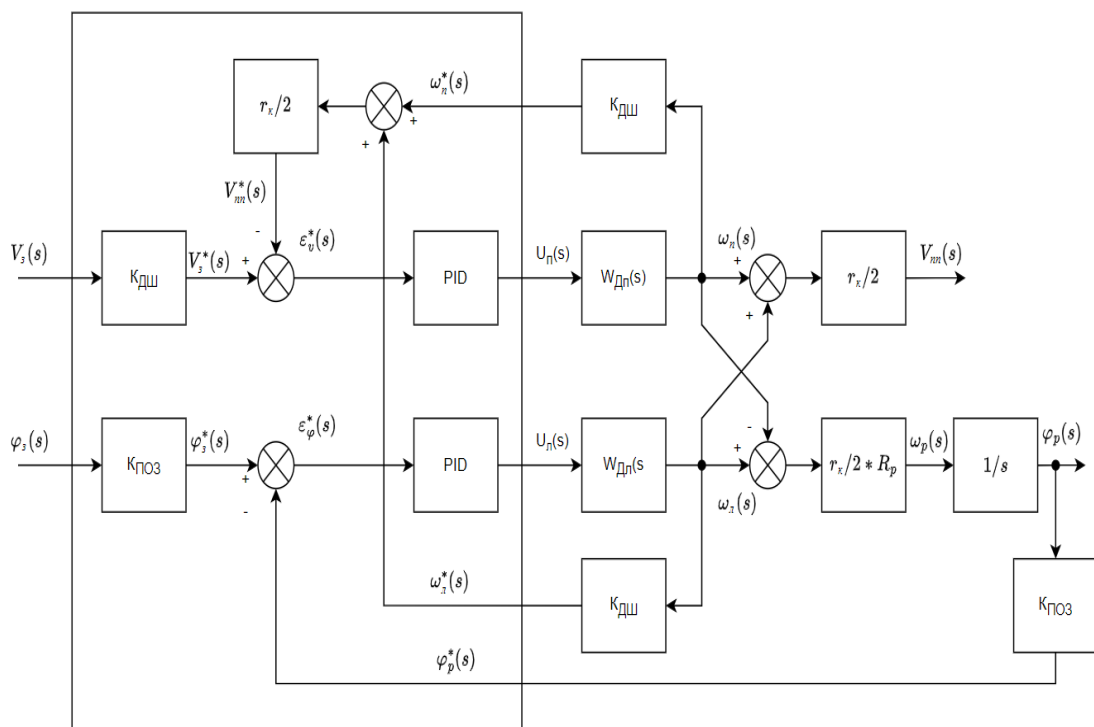


Рисунок 3.4 – Структурна схема системи управління рухом транспортувального засобу-шатлу

Від датчиків швидкості коліс до керуючої частини надходять сигнали $\omega_n^*(s)$ і $\omega_l^*(s)$. За цими даними обчислюється оцінка $V_{\text{пп}}^*(s)$ швидкості поздовжнього руху робота, що дорівнює:

$$V_{\text{пп}}^*(s) = \frac{r_k}{2} \cdot (\omega_n^*(s) + \omega_l^*(s)), \quad (3.34)$$

або з урахуванням коефіцієнту передавання датчика швидкості $K_{\text{дш}}$,

$$V_{\text{пп}}^*(s) = \frac{r_k}{2} \cdot (K_{\text{дш}} \cdot \omega_n^*(s) + K_{\text{дш}} \cdot \omega_l^*(s)). \quad (3.35)$$

З датчика позиціонування в частину управління надходить сигнал $\varphi_p^*(s)$, що дорівнює

$$\varphi_p^*(s) = K_{\text{поз}} \cdot \varphi_p(s). \quad (3.6)$$

Крім цих сигналів цифрової лінії зв'язку від пристрою управління верхнього рівня в керуючу частину подаються значення заданих швидкості поздовжнього руху $V_3^*(s)$ і кута напрямку руху $\varphi_3^*(s)$. У загальному випадку ці сигнали надходять у цифровому вигляді з деяким масштабом, таким чином, можемо записати (у лінійному наближенні):

$$V_3^*(s) = M_v \cdot V_3(s), \quad (3.37)$$

$$\varphi_3^*(s) = M_\varphi \cdot \varphi_3(s), \quad (3.8)$$

де $V_3(s)$ – завдана швидкість поздовжнього руху;

$\varphi_3(s)$ – завдання необхідного напрямку руху;

$V_3(s), \varphi_3(s)$ – подання сигналів керуючої частини з урахуванням масштабів змінних;

M_v, M_φ – постійні масштабні коефіцієнти за швидкістю та кутом напрямку руху, відповідно.

У керуючій частині виміряні та задані значення параметрів руху транспортувального засобу-шатлу порівнюються. Порівнюючи пристрої формують сигнали неузгодженості:

– за швидкістю поздовжнього руху:

$$\varepsilon_v^*(s) = V_3^*(s) - V_{np}^*(s), \quad (3.39)$$

– за кутом напрямку руху:

$$\varepsilon_\varphi^*(s) = \varphi_3^*(s) - \varphi_p(s). \quad (3.40)$$

Для коректного виконання операцій порівняння бажано, щоб масштаби уявлення порівнюваних величин були однаковими, тобто. щоб масштаби M_v та M_φ подання параметрів руху були обрані рівними коефіцієнтами передачі $K_{дш}$ і $K_{поз}$ датчиків, відповідно. Слід зазначити, що іноді компенсації помилок роботи систем управління, масштаби уявлення змінних роблять різними. Однак цей випадок ми розглядати не будемо, а вважатимемо, що для передачі по лінії зв'язку заданих параметрів руху обрані масштаби:

$$M_v = K_{дш}, \quad (3.41)$$

$$M_\varphi = K_{поз}. \quad (3.42)$$

Використання попередніх рівнянь дозволяє визначити сигнали неузгодженості у вигляді:

$$\varepsilon_v^*(s) = K_{дш} \cdot V_3(s) - \frac{r_k}{2} \cdot (K_{дш} \cdot \omega_n(s) + K_{дш} \cdot \omega_l(s)), \quad (3.43)$$

$$\varepsilon_\varphi^*(s) = K_{поз} \cdot \varphi_3(s) - K_{поз} \cdot \varphi_p(s). \quad (3.44)$$

Враховуючи, що швидкість поздовжнього руху транспортувального засобу-шатлу дорівнює

$$V_{пр}(s) = \frac{r_k}{2} \cdot (\omega_n(s) + \omega_l(s)),$$

і виносячи за дужки постійні множники, отримуємо:

$$\varepsilon_v^*(s) = K_{дш} \cdot (V_3(s) - V_{пр}(s)), \quad (3.45)$$

$$\varepsilon_\varphi^*(s) = K_{поз} \cdot (\varphi_3(s) - \varphi_p(s)). \quad (3.46)$$

На цьому, синтез структурної схеми системи управління рухом транспортувального засобу-шатлу можна вважати закінченим. Далі опишемо роботу PID-регулятора.

3.1.4 Параметри автоматичних регуляторів керування швидкістю транспортувального засоба-шатла

Для нормальної експлуатації внутрішньоскладської логістичної системи слід забезпечити мінімальні відхилення від бажаної швидкості перевезення вантажів автономними транспортувальними засобами-шатлами

[95]. Завдяки диференціальному рівнянню (3.11) зрозуміло, що для забезпечення бажаної швидкості (3.7) руху транспортувального засоба-шатла керування (3.15) має дорівнювати нулю:

$$u(t) = 0 \Rightarrow U_e(t) - \frac{R_e}{2B_e} mg\delta - a_0 v_w = 0. \quad (3.47)$$

Із умови (3.47) можемо знайти електричну напругу живлення рушійних електричних двигунів, яка забезпечує бажану кутову швидкість (3.7):

$$U_e(t) = \frac{R_e}{2B_e} mg\delta + a_0 v_w. \quad (3.48)$$

Хоча вираз (3.48) дозволяє підібрати напругу живлення електричних двигунів транспортувального засобу-шатлу, але це принципово неможливо через невизначену масу вантажу, яка може випадково змінюватися у заданих межах, а також через невизначене значення коефіцієнту тертя кочення коліс. Це свідчить про доцільність дослідження потенційних можливостей щодо використання ПД-регуляторів для автоматичного керування швидкістю руху [96] транспортувального засобу-шатлу протягом експлуатації.

Вплив ПД-регулятора на керування швидкістю поступального руху транспортувального засобу-шатлу полягає у неперервному корегуванні керування таким чином, що диференціальне рівняння (3.11) набуде такого вигляду (рис 3.5):

$$a_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = u(t) - k_p x - k_I \int x(t) dt - k_D \frac{dx}{dt}, \quad (3.49)$$

де k_p , k_I та k_D – параметри ПД-регулятора, які визначають відповідно його пропорційну, інтегральну та диференціальну складову.

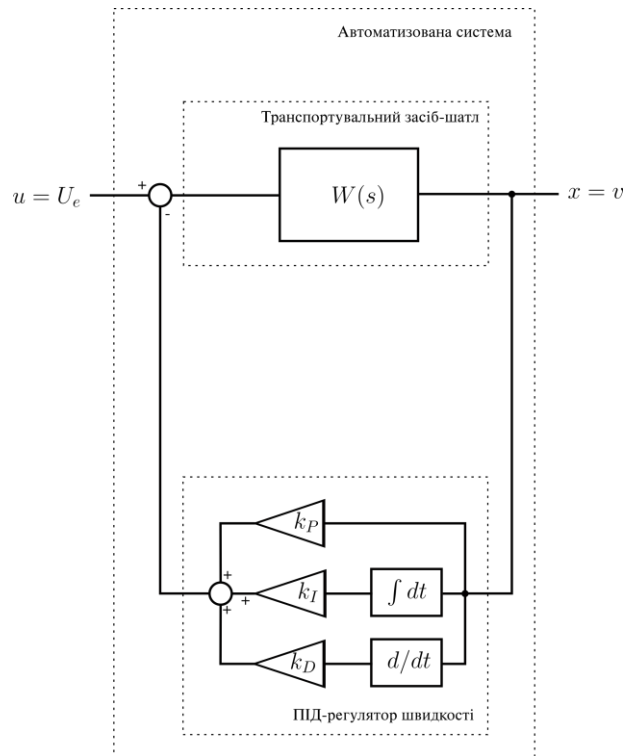


Рисунок 3.5 – Структурна схема автоматизованої системи транспортувального засоба-шатла із автоматичним ПД- регулятором швидкості

Щоб представити співвідношення (3.49) у більш зручному вигляді ,введемо до розгляду нову змінну наступного вигляду:

$$\frac{d\tilde{x}}{dt} = x, \quad \tilde{x}(t_0) = 0, \quad (3.50)$$

де $\tilde{x} = \tilde{x}(t)$ – нова змінна.

Завдяки новій змінній (3.50), співвідношення (3.49), а також початкові умови (3.14) після відповідних тотожних перетворень набудуть вигляду:

$$a_2 \frac{d^3 \tilde{x}}{dt^3} + (a_1 + k_D) \frac{d^2 \tilde{x}}{dt^2} + (a_0 + k_P) \frac{d\tilde{x}}{dt} + k_I \tilde{x} = u(t), \quad (3.51)$$

$$\tilde{x}(t_0) = 0, \quad \frac{d\tilde{x}}{dt}(t_0) = 0, \quad \frac{d^2 \tilde{x}}{dt^2}(t_0) = 0. \quad (3.52)$$

У вигляді (3.350)–(3.52) маємо математичну модель процесу керування ПД-регулятором швидкістю поступального руху транспортувального засобу-шатлу. Ідея полягає в тому, щоб за рахунок вибору параметрів ПД-регулятора впливати на відповідні процеси без зміни параметрів конструкцій та систем власне самого транспортувального засобу-шатлу.

Для визначення параметрів ПД-регулятора [97], які забезпечують стійкість бажаного руху (3.7) транспортувального засобу-шатлу із постійною швидкістю використаємо диференціальне рівняння (3.51) та схему Рауса, яка для цього диференціального рівняння прийме такий вигляді:

$$\begin{array}{cc} a_2 & a_0 + k_P \\ a_1 + k_D & k_I \end{array} \quad (3.53)$$

$$\frac{(a_1 + k_D)(a_0 + k_P) - a_2 k_I}{a_1 + k_D}$$

Відповідно із виразами (3.5) маємо, що

$$a_2 > 0, \quad a_1 > 0, \quad a_0 > 0. \quad (3.54)$$

З урахуванням першої нерівності (3.54) та схеми Рауса (3.3.53) відповідно критерію Рауса маємо такі умови:

$$a_1 + k_D > 0, \quad (a_1 + k_D)(a_0 + k_P) - a_2 k_I > 0. \quad (3.55)$$

З урахуванням другої нерівності (3.55) перша нерівність (3.52) свідчить про те, що параметр ПД-регулятора, який визначає диференціальну складову:

$$k_D > -a_1. \quad (3.56)$$

З урахуванням значень (3.54) та другої умови (3.55) маємо, що параметри ПД-регулятора, які визначають його інтегральну та пропорційну складові:

$$k_I < \frac{(a_1 + k_D)(a_0 + k_P)}{a_2}. \quad (3.57)$$

Умови (3.55) свідчать, що маємо можливість обирати параметри ПД-регулятора швидкості руху транспортувального засобу-шатлу у досить широких межах, але при виборі таких параметрів слід враховувати також суто технічні обмеження, щоб мати керування, які можна реалізувати фізично, у тому числі без пошкоджень конструкцій та систем транспортувального засобу-шатлу. Більш того, умови (3.55) слід розглядати виключно як такі, що визначають множину допустимих значень параметрів ПД-регулятора, а для визначення самих параметрів слід залучати додаткові умови для забезпечення бажаних властивостей процесу автоматичного керування швидкістю руху.

Формулювання таких додаткових умов істотно залежить від призначення та бажаних характеристик внутрішньоскладської логістичної системи, в якій використовується транспортувальний засіб-шатл, отже розгляд таких умов може розглядатися лише в контексті конкретної логістичної системи.

Загальні додаткові умови щодо визначення параметрів ПД-регулятора можна формулювати через бажаний вигляд амплітудно-частотної характеристики.

Перетворення Лапласа (3.19) та математична модель (3.50)–(3.52) приводять до представлення лінійного об'єкту автоматизації у вигляді динамічної ланки (див. рис. 3.1) та поняття про передаточну функцію, яка в даному випадку набуде такого вигляду:

$$W(s) = \frac{s}{a_2 s^3 + (a_1 + k_D) s^2 + (a_0 + k_P) s + k_I}, \quad (3.56)$$

де $W(s)$ – передаточна функція процесу керування ПД-регулятором швидкістю перевезення вантажів транспортувальним засобом-шатлом.

Врахуємо вираз (3.22) в передаточній функції (3.56) та матимемо таке:

$$W(i\omega) = \frac{i\omega}{k_I - (a_1 + k_D)\omega^2 + i(a_0 + k_P - a_2\omega^2)\omega}. \quad (3.57)$$

Виконаємо тотожні перетворення виразу (3.57) та отримаємо в результаті:

$$W(i\omega) = \omega \frac{(a_0 + k_P - a_2\omega^2)\omega + i(k_I - (a_1 + k_D)\omega^2)}{(k_I - (a_1 + k_D)\omega^2)^2 + (a_0 + k_P - a_2\omega^2)^2 \omega^2}. \quad (3.58)$$

Завдяки виразу (3.58) маємо амплітудно-частотну характеристику процесу керування ПД-регулятором швидкістю транспортувального засобу-шатлу:

$$A(\omega) = \frac{\omega}{\sqrt{(k_I - (a_1 + k_D)\omega^2)^2 + (a_0 + k_P - a_2\omega^2)^2 \omega^2}}, \quad (3.59)$$

де $A(\varpi)$ – амплітуда керованого параметру залежна від частоти керування.

Дослідження амплітудно-частотної характеристики (3.59) зводиться до дослідження властивостей її знаменнику, тобто функції

$$\varphi(\varpi) = \left(k_I - (a_1 + k_D)\varpi^2\right)^2 + \left(a_0 + k_P - a_2\varpi^2\right)^2 \varpi^2. \quad (3.60)$$

Перетворимо вираз функції (3.59) до більш зручного вигляду:

$$\begin{aligned} \varphi(\varpi) = & a_2\varpi^6 + \left((a_1 + k_D)^2 - 2a_2(a_0 + k_P)\right)\varpi^4 + \\ & + \left((a_0 + k_P)^2 - 2k_I(a_1 + k_D)\right)\varpi^2 + k_I^2. \end{aligned} \quad (3.61)$$

Щоб визначити стаціонарні точки функції (3.61), використаємо її похідні:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{d\varpi}(\varpi) = & 6a_2\varpi^5 + 4\left((a_1 + k_D)^2 - 2a_2(a_0 + k_P)\right)\varpi^3 + \\ & + 2\left((a_0 + k_P)^2 - 2k_I(a_1 + k_D)\right)\varpi. \end{aligned} \quad (3.62)$$

Стаціонарні точки функції (3.50) визначають рівністю нулю похідної (3.62):

$$\varpi = 0, \quad (3.63)$$

$$6a_2\varpi^4 + 4\left((a_1 + k_D)^2 - 2a_2(a_0 + k_P)\right)\varpi^2 + 2\left((a_0 + k_P)^2 - 2k_I(a_1 + k_D)\right) = 0. \quad (3.64)$$

Маємо одну стаціонарну точку (3.63) та чотири стаціонарних точки, що є коренями біквдратного рівняння (3.64).

Щоб уникнути резонансних явищ, можемо підібрати параметри таким чином, щоб корені бікватратного рівняння (3.64) були комплексними числами:

$$(a_1 + k_D)^2 - 2a_2(a_0 + k_P) > 0. \quad (3.65)$$

Зрозуміло, що умову (3.65) слід використовувати разом із умовами (3.55), що буде зменшувати можливі значення параметрів ПД-регулятора. У вигляді (3.65) маємо додаткову умову для визначення параметрів ПД-регулятора автоматичного керування швидкістю, якому будуть притаманні додаткові можливості щодо уникнення резонансних явищ.

3. 2 Розроблення алгоритму роботи системи керування

Алгоритм роботи керування транспортувальним роботом-шатлом показано на рисунку 3.6.

Основні етапи роботи алгоритму наступні:

- перевірка працездатності модулів системи управління;
- якщо модулі не пройшли перевірку, то виводиться повідомлення про помилку та система переходить в аварійний режим;
- визначення цілі для переміщення виробничим простором;
- управління рухом транспортувального роботу-шатлу;
- виконання задачі управління підсистемою руху поки ціль переміщення буде досягнута;
- розвантаження транспортувального роботу;
- повернення до режиму отримання завдання.

Першим етапом даного алгоритму є перевірка працездатності модулів системи управління.

На цьому етапі система проводить діагностику всіх основних компонентів, включаючи електронні, механічні та програмні модулі системи.

Система перевіряє датчики, двигуни, контролери та комунікаційні інтерфейси для виявлення можливих несправностей. Така перевірка є необхідною для того, щоб забезпечити правильну роботу транспортувального робота в процесі виконання завдань.

На цьому етапі система ініціює процедуру самодіагностики для всіх основних компонентів, які залучені до процесу управління та навігації. Спочатку відбувається ініціалізація системи, під час якої завантажуються базові програмні компоненти, драйвери та виконується початкова перевірка апаратних засобів.

Наступний етап перевірки працездатності модулів системи управління – це перевірка електронних і механічних модулів. Тут система тестує датчик, що задіяні в роботі та ті, що відповідальні за сприйняття навколишнього середовища. Такими датчикам є: датчики відстані, камери, інерційні вимірювальні одиниці (IMU), а також лазерні або ультразвукові сенсори для виявлення перешкод. Кожен з цих модулів передає дані до центрального контролера, який перевіряє їхню працездатність на основі очікуваних значень або діапазонів. Якщо якийсь із сенсорів не передає коректні дані або не відповідає, система фіксує помилку.

Далі відбувається діагностика виконавчих механізмів, таких як двигуни, що відповідають за рух, і системи приводів. Також система виконує перевірку комунікаційних модулів. Оскільки робот-шатл інтегрований у загальну виробничу систему, перевіряється працездатність бездротових або дротових інтерфейсів зв'язку, таких як Wi-Fi, Bluetooth і інші мережеві протоколи. Це дозволяє переконатися, що робот здатний отримувати команди від центральної системи керування та передавати звіти про стан у реальному часі.

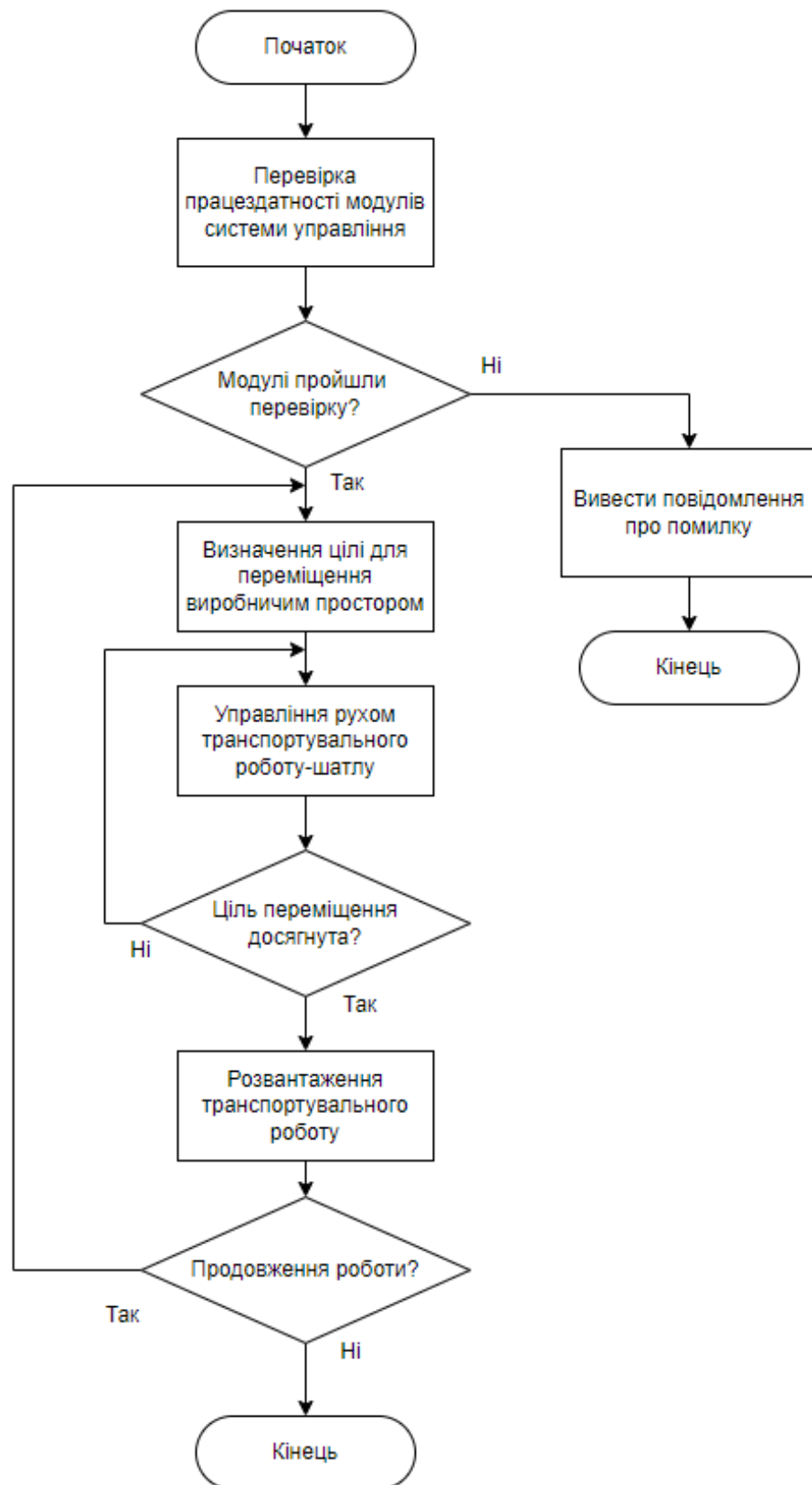


Рисунок 3.6– Алгоритм роботи системи керування транспортувальним роботом-шатлом

Якщо всі модулі пройшли перевірку, система переходить до наступного етапу роботи – визначення цілі для переміщення. У разі, якщо якийсь із модулів не пройшов перевірку, система негайно виводить повідомлення про помилку. Це повідомлення містить інформацію про причину збою, а система переходить в аварійний режим. В аварійному режимі робота зупиняється, і система очікує подальших дій від оператора або технічного персоналу. Це дозволяє запобігти небажаним наслідкам в роботі, або аварійним ситуаціям у виробничому середовищі.

Якщо в ході перевірки виявляються несправності, система виводить повідомлення про помилку та переходить в аварійний режим. У цьому стані система повністю зупиняє роботу для усунення помилок, або обмежує функціональність до мінімуму, щоб уникнути подальших збоїв або аварійних ситуацій.

Наступний етап алгоритму – це визначення цілі для переміщення виробничим простором. У цьому кроці система отримує завдання, яке включає кінцеву точку, до якої необхідно доставити вантаж. Мета може бути динамічною, тобто змінюватися залежно від виробничого процесу або запланованої маршрутизації. Для цього етапу важливими є алгоритми планування маршрутів і управління черговістю завдань, щоб забезпечити оптимальне використання транспортувального робота.

Після визначення цілі починається етап управління рухом транспортувального робота-шатлу. На цьому етапі система розраховує траєкторію руху, враховуючи перешкоди на шляху та інші динамічні умови в реальному часі.

Ключовим інструментом управління швидкістю і точністю руху є використання ПД-регулятора. ПД-регулятор забезпечує точну відповідність реальної швидкості руху заданим параметрам, коригуючи рух залежно від відхилень. Це дозволяє роботу плавно долати зміни в умовах навантаження або опору.

Протягом усього руху система продовжує виконувати задачу управління підсистемою руху, доки ціль переміщення не буде досягнута. Тут важливою є сумісна робота датчиків і системи навігації, які дозволяють уникати зіткнень з перешкодами та гарантувати безпеку як самого робота, так і оточуючого середовища.

Досягнувши цільову точку, система очікує завершення етапу розвантаження транспортувального робота. Залежно від типу вантажу та специфіки виробництва цей процес може бути автоматизованим або вимагати мінімального втручання з боку оператора. Після завершення процесу розвантаження робот-шатл готовий до виконання наступного завдання.

Останній етап – це повернення до режиму отримання завдання. Система повертається в режим очікування, де вона або отримує нову ціль для переміщення, або перебуває у стані готовності до наступного виклику. Цей цикл повторюється залежно від виробничих потреб і плану роботи.

3.3 Автоматичне переміщення транспортувального засобу-шатла за допомогою ПД-регулятора

3.3.1 Математична модель керування переміщеннями вантажів транспортувального засоба-шатла

Перевезення вантажів за допомогою транспортних засобів-шатлів мають відбуватись таким чином, щоб вантаж був доставлений у задане положення відносно складників логістичної системи, що потребує розгляду відповідної проблеми керованості [98]. Для автоматичного транспортувального засоба-шатла задане переміщення має бути забезпечене за допомогою окремої автоматизованої системи [99-103].

Математичну модель процесу керування шляхом переміщення розглянемо далі на основі отриманих у підрозділ. 3.1 результатів. Положення

транспортувального засобу-шатлу визначимо відповідною прямолінійною координатою, яка зв'язана із його швидкістю (3.1):

$$\frac{dS}{dt} = v(t), \quad S(t_0) = S_0, \quad (3.66)$$

де $S = S(t)$ – залежна від часу прямолінійна координата, яка характеризує положення транспортувального засоба-шатла відносно складників логістичної системи; S_0 – значення координати S в початковий момент часу $t = t_0$.

Завдяки двом співвідношенням (3.66) маємо можливість здійснити перетворення диференціального рівняння (3.6) та початкових умов (3.4):

$$a_2 \frac{d^3 S}{dt^3} + a_1 \frac{d^2 S}{dt^2} + a_0 \frac{dS}{dt} = f(t), \quad (3.67)$$

$$S(t_0) = S_0, \quad \frac{dS}{dt}(t_0) = \omega_0 r_w, \quad \frac{d^2 S}{dt^2}(t_0) = \frac{2B_e r_w}{J} I_0 - \frac{r_w B}{J} \omega_0 - \frac{r_w mg \delta}{J}. \quad (3.68)$$

Математичну модель процесу переміщення вантажів транспортувальним засобом-шатлом маємо у вигляді диференціального рівняння (3.67) та початкових умов (3.68). Прямолінійну координату $S = S(t)$ розглядаємо як керований параметр, а допоміжною величину $f(t)$, що введена в останньому виразі (3.5), розглядаємо як характеристику керування, яке забезпечує потрібне переміщення. Порівняння диференціальних рівнянь (3.67) та (3.6) свідчить, що керування переміщенням є більш складним, ніж керування швидкістю.

Забезпечення заданого переміщення при перевезенні вантажів транспортувальним засобом-шатлом зводиться до задоволення рівності:

$$S(t_f) = S_f, \quad (3.69)$$

де t_f та S_f – момент часу та прямолінійна координата транспортувального засобу-шатла, на момент завершення переміщення вантажу.

Максимально узгоджена робота внутрішньоскладської логістичної системи забезпечується належним вибором відповідних значень t_f та S_f із умови (3.69) при кожному перевезенні вантажу автоматичним транспортувальним засобом-шатлом. Робота складської логістичної системи забезпечується належним вибором значень S_f незалежно від вибору моменту часу t_f при кожному перевезенні вантажу, оскільки саме величиною S_f визначається необхідне позиціонування автоматичного транспортувального засоба-шатла відносно її складових, що забезпечують поводження із вантажами.

Використання ПД-регулятора щодо задовольняння умови (3.58) зводиться насправді до зменшення розбіжності між поточним значенням $S(t)$ та заданим бажаним значенням S_f прямолінійної координати транспортувального засобу-шатла, отже ведемо до розгляду таку величину:

$$x(t) = S(t) - S_f, \quad (3.70)$$

де $x(t)$ – величина переміщення транспортувального засоба-шатла від його початкового положення.

Завдяки введеній величині (3.70) можемо визначити:

$$S(t) = x(t) + S_f. \quad (3.71)$$

Через (3.71) рівняння (3.6) та початкові умови (3.4) набудуть такого вигляду:

$$a_2 \frac{d^3 x}{dt^3} + a_1 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_0 \frac{dx}{dt} = u(t), \quad (3.72)$$

$$x(t_0) = S_0 - S_f, \quad \frac{dx}{dt}(t_0) = \omega_0 r_w, \quad \frac{d^2 x}{dt^2}(t_0) = \frac{2B_e r_w}{J} I_0 - \frac{r_w B}{J} \omega_0 - \frac{r_w mg \delta}{J}. \quad (3.73)$$

$$u(t) = f(t), \quad (3.74)$$

де $u(t)$ – керування переміщенням транспортувального засобу-шатла.

Переміщення вантажів автоматичним транспортувальним засобом-шатлом практично здійснюється від заданого початкового положення до потрібного положення таким чином, що в початковому та в потрібному положенні маємо нерухомий транспортувальний засіб-шатл. У подальших дослідженнях щодо питань автоматизації процесу переміщення вантажу транспортувальним засобом-шатлом замість початкових умов загального вигляду (3.73) розглядаємо нульові початкові значення, які відповідні нерухомому транспортувальному засобі-шатлі, тобто початкові умови такого вигляду:

$$x(t_0) = S_0 - S_f, \quad \frac{dx}{dt}(t_0) = 0, \quad \frac{d^2 x}{dt^2}(t_0) = 0. \quad (3.75)$$

У вигляді (3.72), (3.75) маємо математичну модель процесу керування переміщенням транспортувального засоба-шатла при перевезенні вантажу.

3.3.2 Властивості процесів керування переміщення при транспортуванні вантажів автоматичного транспортувального засоба-шатла

Для подальшого розгляду інженерних задач щодо автоматичного керування переміщенням перевезення вантажів транспортувальним засобом-шатлом з урахуванням вигляду диференціального рівняння (3.72) зручно використовувати введені раніше позначення (3.16), а в якості початкового моменту часу розглядати момент часу (3.17). Таким чином, з урахуванням позначень (3.16) та прийнятого значення (3.17) математична модель (3.72), (3.75) набуде такого вигляду:

$$\frac{d^3x}{dt^3} + 2n \frac{d^2x}{dt^2} + \Omega^2 \frac{dx}{dt} = \beta f(t), \quad x(0) = S_0 - S_f, \quad \frac{dx}{dt}(0) = 0, \quad \frac{d^2x}{dt^2}(0) = 0. \quad (3.76)$$

Завдяки властивості лінійності та нульовим початковим умовам математичну модель (3.76) зручно розглядати у нових змінних, введених за допомогою перетворення Лапласа (3.19), яке приводить до динамічної ланки (рис. 3.1) із передаточною функцією:

$$W(s) = \frac{\beta}{s^3 + 2ns^2 + \Omega^2 s}. \quad (3.77)$$

де $W(s)$ – передаточна функція процесу керування переміщенням при перевезенні вантажів засобом-шатлом.

Розглянемо далі амплітудно-частотну характеристику процесу керування швидкістю перевезення вантажів транспортувальним засобом-шатлом. Для цього врахуємо вираз (3.22) в передаточній функції (3.77) та матимемо:

$$W(i\omega) = \frac{\beta}{-2n\omega^2 + i(\Omega^2 - \omega^2)\omega}. \quad (3.78)$$

Виконаємо тотожні перетворення виразу (3.78) та отримаємо в результаті:

$$W(i\varpi) = -\frac{2n\varpi}{4n^2\varpi^4 + \varpi^2(\Omega^2 - \varpi^2)^2} \beta - i \frac{\varpi(\Omega^2 - \varpi^2)}{4n^2\varpi^4 + \varpi^2(\Omega^2 - \varpi^2)^2} \beta. \quad (3.79)$$

Завдяки виразу (3.79) одразу ж маємо амплітудно-частотну характеристику процесу керування швидкістю перевезення вантажів транспортувальним засобом-шатлом у такому вигляді:

$$A(\varpi) = \frac{\beta}{\sqrt{4n^2\varpi^4 + \varpi^2(\Omega^2 - \varpi^2)^2}}, \quad (3.80)$$

де $A(\varpi)$ – амплітуда керованого параметру залежного від частоти керування.

Дослідимо знаменник амплітудно-частотної характеристики (3.25):

$$\varphi(\varpi) = 4n^2\varpi^4 + \varpi^2(\Omega^2 - \varpi^2)^2. \quad (3.81)$$

Спростимо вираз (3.81) шляхом здійснення тотожних перетворювань:

$$\varphi(\varpi) = \varpi^6 + 2(2n^2 - \Omega^2)\varpi^4 + \Omega^4\varpi^2. \quad (3.82)$$

Щоб визначити стаціонарні точки функції (3.82), використаємо її похідні:

$$\frac{d\varphi}{d\varpi}(\varpi) = 6\varpi^5 + 8(2n^2 - \Omega^2)\varpi^3 + 2\Omega^4\varpi, \quad (3.83)$$

$$\frac{d^2\varphi}{d\varpi^2}(\varpi) = 30\varpi^4 + 24(2n^2 - \Omega^2)\varpi^2 + 2\Omega^4. \quad (3.84)$$

Стаціонарні точки функції (3.81) визначаються за першої похідної (3.83):

$$3\varpi^5 + 4(2n^2 - \Omega^2)\varpi^3 + \Omega^4\varpi = 0. \quad (3.85)$$

Рівняння (3.85) має п'ять коренів:

$$\varpi = 0, \quad \varpi^2 = \frac{-4(2n^2 - \Omega^2) \pm \sqrt{16(2n^2 - \Omega^2)^2 - 12\Omega^4}}{6}. \quad (3.86)$$

Маємо мінімум в точці $\varpi = 0$ завдяки значенню другої похідної (3.84):

$$\frac{d^2\varphi}{d\varpi^2}(0) = 2\Omega^4 > 0. \quad (3.87)$$

Корені (3.86) будуть дійсними за виконання таких умов:

$$2n^2 - \Omega^2 < 0, \quad 4(2n^2 - \Omega^2)^2 - 3\Omega^4 > 0. \quad (3.88)$$

За виконання умов (3.88) будемо мати резонансні явища, а щоб уникнути їх слід навпаки забезпечити комплексні корені (3.786), що приведе до умов:

$$2n^2 - \Omega^2 > 0, \quad (3.89)$$

$$4(2n^2 - \Omega^2)^2 - 3\Omega^4 < 0. \quad (3.90)$$

Виконання умови (3.89) або умови (3.90) достатньо, щоб уникнути резонансних явищ в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі.

3.3.3 Параметри автоматичних регуляторів керування переміщенням транспортувального засоба-шатла

Для нормальної експлуатації складської логістичної системи слід забезпечити мінімальні відхилення [100-103] від бажаних переміщень перевезення вантажів автономними транспортувальними засобами-шатлами. Вплив ПД-регулятора переміщення вантажу автоматичним транспортувальним засобом-шатлом зводиться до неперервного корегування керування таким чином, що диференціальне рівняння (3.61) набуде такого вигляду (рис. 3.7):

$$a_2 \frac{d^3 x}{dt^3} + a_1 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_0 \frac{dx}{dt} = u(t) - K_p x - K_I \int x(t) dt - K_D \frac{dx}{dt}, \quad (3.91)$$

де K_p , K_I та K_D – параметри ПД-регулятора переміщення вантажу транспортувальним засобом-шатлом, які визначають відповідно його пропорційну, інтегральну та диференціальну складову.

Щоб представити співвідношення (3.91) у більш зручному вигляді введемо до розгляду нову змінну вигляду (3.75), завдяки якій співвідношення (3.91), а також початкові умови (3.75) набудуть такого вигляду:

$$a_2 \frac{d^4 \tilde{x}}{dt^4} + a_1 \frac{d^3 \tilde{x}}{dt^3} + (a_0 + K_D) \frac{d^2 \tilde{x}}{dt^2} + K_p \frac{d\tilde{x}}{dt} + K_I \tilde{x} = u(t), \quad (3.92)$$

$$\tilde{x}(t_0) = 0, \quad \frac{d\tilde{x}}{dt}(t_0) = S_0 - S_f, \quad \frac{d^2 \tilde{x}}{dt^2}(t_0) = 0, \quad \frac{d^3 \tilde{x}}{dt^3}(t_0) = 0. \quad (3.93)$$

З урахуванням останнього виразу (3.5) маємо керування (3.74) процесом переміщення вантажу транспортувальним засобом-шатлом у такому вигляді:

$$u(t) = U_e(t) - \frac{R_e}{2B_e} mg\delta. \quad (3.94)$$

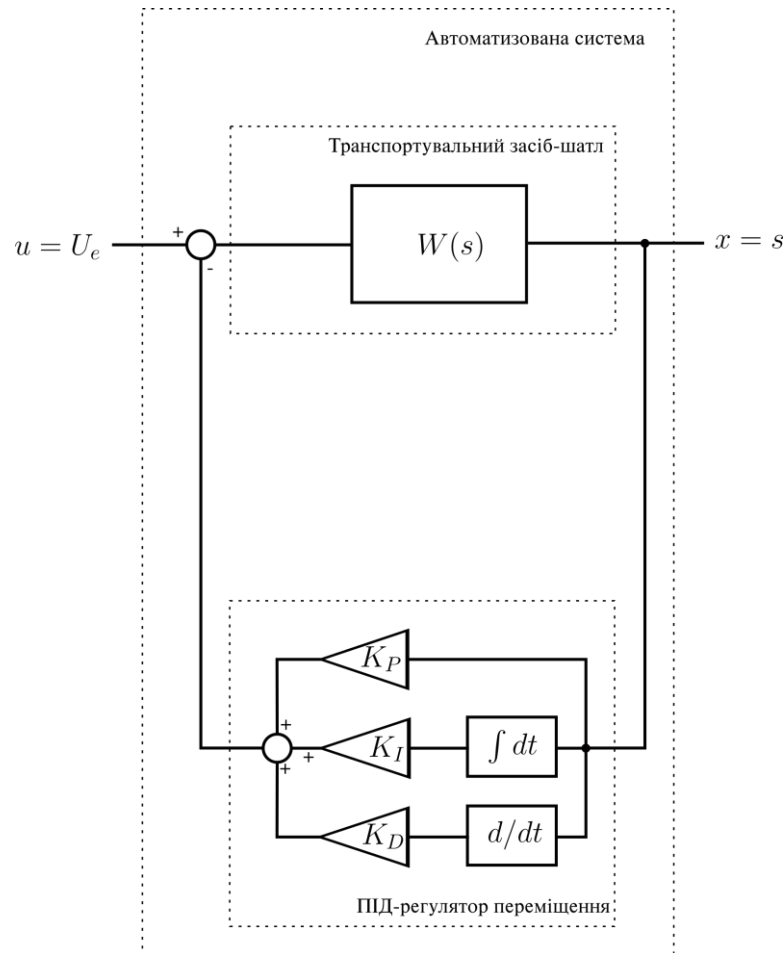


Рисунок 3.7 – Структурна схема автоматизованої системи транспортувального засоба-шатла із автоматичним ПІД-регулятором переміщення

Завдяки диференціальному рівнянню (3.92) зрозуміло, що для забезпечення бажаного переміщення (3.69) величина (3.94) має дорівнювати нулю:

$$u(t) = 0 \Rightarrow U_e(t) - \frac{R_e}{2B_e} mg\delta = 0. \quad (3.95)$$

Умова (3.95) визначає електричну напругу живлення електричних двигунів, яка забезпечує бажане переміщення (3.69):

$$U_e(t) = \frac{R_e}{2B_e} mg\delta. \quad (3.100)$$

За допомогою виразу (3.95) можемо підібрати електричну напругу живлення рушійних електричних двигунів транспортувального засобу-шатла, але це принципово неможливо через невизначену масу вантажу, яка може випадково змінюватися у заданих межах, а також через невизначене значення коефіцієнту тертя кочення коліс.

Означені умови свідчать про доцільність дослідження потенційних можливостей щодо використання ПД-регуляторів для автоматичного керування переміщенням транспортувального засобу-шатла.

У вигляді (3.92)–(3.94) маємо математичну модель процесу керування ПД-регулятором переміщенням при перевезенні вантажів транспортувальним засобом-шатлом.

Ідея полягає в тому, щоб за рахунок вибору параметрів ПД-регулятору мати можливість впливати на відповідні процеси без зміни параметрів конструкцій та систем самого транспортувального засобу-шатла.

Для визначення параметрів ПД-регулятору, які забезпечують стійкість бажаного руху (3.92) транспортувального засоба-шатла із поточного нерухомого положення в задане інше положення при перевезенні вантажів використаємо диференціальне рівняння (3.92) та схему Рауса:

$$\begin{array}{ccc|c} a_2 & a_0 + K_D & K_I & \\ a_1 & K_P & & \\ c_0 & K_I & & \\ \frac{c_0 K_P - a_1 K_I}{c_0} & & & \\ K_I & & & \end{array}, c_0 = \frac{a_1(a_0 + K_D) - a_2 K_P}{a_1} \quad (3.101)$$

Відповідно із виразами (3.5) маємо нерівності (3.54), з урахуванням яких та схеми Рауса (3.86) відповідно критерію Рауса маємо такі умови:

$$a_1(a_0 + K_D) - a_2 K_P > 0, (a_1(a_0 + K_D) - a_2 K_P) K_P - a_1^2 K_I > 0, K_I > 0. \quad (3.102)$$

Перша нерівність (3.102) свідчить, що диференціальна та пропорційна складові ПД-регулятора положення, мають задовольняти умові:

$$K_P < \frac{a_1}{a_2}(a_0 + K_D). \quad (3.103)$$

З урахуванням першої нерівності (3.102) також маємо:

$$K_I < \frac{a_1(a_0 + K_D) - a_2 K_P}{a_1^2} K_P, K_I > 0. \quad (3.104)$$

Умови (3.102) свідчать, що маємо можливість обрати ПД-регулятор переміщення транспортувального засоба-шатла у досить широких межах, але при виборі таких параметрів, зрозуміло, слід враховувати також суто технічні обмеження, щоб мати керування, які можна реалізувати фізично, у тому числі без пошкоджень конструкцій та систем.

Найбільш загальні додаткові умови щодо визначення параметрів ПД-регулятора можна формулювати відповідно до бажаного вигляду амплітудно-частотної характеристики.

Перетворення Лапласа (3.19) та диференціальне рівняння (3.92) природно приводять до лінійного об'єкту автоматизації у вигляді динамічної ланки (див. рис. 3.1) із передаточною функцією:

$$W(s) = \frac{s}{a_2 s^4 + a_1 s^3 + (a_0 + K_D) s^2 + K_P s + K_I}, \quad (3.105)$$

де $W(s)$ – передаточна функція процесу керування ПД-регулятором переміщення транспортувального засоба-шатла при перевезенні ним вантажів.

Врахуємо вираз (3.22) в передаточній функції (3.90) та матимемо таке:

$$W(i\omega) = \frac{i\omega}{a_2 \omega^4 - (a_0 + K_D) \omega^2 + K_I + i(K_P - a_1 \omega^2) \omega}. \quad (3.106)$$

Виконаємо тотожні перетворення виразу (3.106) та отримаємо в результаті

$$W(i\omega) = \omega \frac{-(K_P - a_1 \omega^2) \omega + i(a_2 \omega^4 - (a_0 + K_D) \omega^2 + K_I)}{(a_2 \omega^4 - (a_0 + K_D) \omega^2 + K_I)^2 + (K_P - a_1 \omega^2)^2 \omega^2}. \quad (3.107)$$

Завдяки виразу (3.107) одразу ж маємо амплітудно-частотну характеристику процесу керування ПД-регулятором у такому вигляді:

$$A(\omega) = \frac{\omega}{\sqrt{(a_2 \omega^4 - (a_0 + K_D) \omega^2 + K_I)^2 + (K_P - a_1 \omega^2)^2 \omega^2}}, \quad (3.108)$$

де $A(\varpi)$ – амплітуда керованого параметру залежна від частоти керування.

Дослідження амплітудно-частотної характеристики (3.93) зводиться до дослідження характерних властивостей її знаменнику:

$$\varphi(\varpi) = (a_2\varpi^4 - (a_0 + K_D)\varpi^2 + K_I)^2 + (K_P - a_1\varpi^2)^2 \varpi^2. \quad (3.109)$$

Функція (3.109) представляє собою поліном восьмого ступеня:

$$\begin{aligned} \varphi(\varpi) = & a_2^2\varpi^8 + (a_1^2 - 2a_2(a_0 + K_D))\varpi^6 + (a_0 + K_D + 2(a_2K_I - a_1K_P))\varpi^4 + \\ & + (K_P^2 - 2(a_0 + K_D)K_I)\varpi^2 + K_I^2. \end{aligned} \quad (3.110)$$

Щоб визначити стаціонарні точки функції (3.110), використаємо її похідну:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{d\varpi}(\varpi) = & 8a_2^2\varpi^7 + 6(a_1^2 - 2a_2(a_0 + K_D))\varpi^5 + \\ & + 4(a_0 + K_D + 2(a_2K_I - a_1K_P))\varpi^3 + 2(K_P^2 - 2(a_0 + K_D)K_I)\varpi. \end{aligned} \quad (3.111).$$

Стаціонарні точки (3.95) визначаються рівністю нулю першої похідної (3.111):

$$\varpi = 0, \quad (3.112)$$

$$\begin{aligned} 4a_2^2\varpi^6 + 3(a_1^2 - 2a_2(a_0 + K_D))\varpi^4 + 2(a_0 + K_D + 2(a_2K_I - a_1K_P))\varpi^2 + \\ + (K_P^2 - 2(a_0 + K_D)K_I) = 0. \end{aligned} \quad (3.113)$$

Як свідчить рівняння (3.113) у випадку дійсного кореня ϖ^2 матимемо три резонансних частоти, тому для уникнення таких явищ слід задовольнити:

$$\operatorname{Im}(\varpi^2) \neq 0, \quad (3.114)$$

де ϖ^2 – корінь рівняння (3.113).

Таким чином, маємо можливість сформулювати додаткову умову (3.99) для визначення параметрів ПД-регулятора для автоматичного керування переміщенням, якому будуть притаманні додаткові можливості щодо уникнення резонансних явищ.

3.4 Взаємний вплив ПД-регуляторів швидкості та розташування на керування переміщенням автоматичного транспортувального засоба-шатла

Відповідно до свого призначення автоматичні транспортувальні засоби-шатли мають забезпечувати перевезення вантажів до заданого місця із необхідною точністю позиціонування таким чином, щоб швидкість транспортування не перевищувала заданого значення, обмеженого умовами безпеки експлуатації логістичної системи та уникнення пошкоджень вантажів.

При використанні автоматичного ПД-регулятора переміщення швидкість транспортування не є контрольованою та визначається параметрами регулятора і поточним станом автоматичного транспортувального засоба-шатла, що приводить в результаті до непередбачуваної швидкості перевезення вантажів, яка створює відповідні небезпеки для конструкцій логістичної системи та створює можливість пошкодження вантажів.

За цих умов природно розглянути можливість сумісного використання ПД-регулятора переміщення та ПД-регулятора швидкості автоматичного транспортувального засоба-шатла.

3.4.1 Лінійне автоматичне керування переміщенням із заданою швидкістю

Основна ідея автоматичного керування для забезпечення заданого переміщення вантажів із заданою швидкістю полягає у сумісному використанні ПД-регулятора переміщення та ПД-регулятора швидкості автоматичного транспортувального засоба-шатла.

Для дослідження процесу керування переміщення із заданою швидкістю використовуємо розглянуту вище математичну модель переміщення транспортувального засоба-шатла із заданого початкового розташування у вигляді диференціального рівняння (3.56) із початковими умовами (3.79).

Оскільки, основним призначенням автоматичного транспортувального засоба-шатла є перевезення вантажу до точно заданого місця, то розглядаємо нову змінну що визначає відстань між поточним та заданим скінченим положеннями, що введена вище у вигляді (3.81). Відповідно до прийнятої нової змінної (3.81) та з урахуванням співвідношення (3.71) визначимо швидкість транспортувального засоба-шатла:

$$v(t) = \frac{dx}{dt}. \quad (3.115)$$

З урахуванням виразу (3.115) включимо до співвідношення (3.91) додаткові доданки, відповідні ПД-регулятору швидкості аналогічно співвідношенню (3.49) й умові (3.7) та в результаті цього матимемо таке (рис.3.8):

$$a_2 \frac{d^3 x}{dt^3} + a_1 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_0 \frac{dx}{dt} = u(t) - K_P x - K_I \int x(t) dt - K_D \frac{dx}{dt} - k_P \left(\frac{dx}{dt} - v_W \right) - k_I \int \left(\frac{dx}{dt} - v_W \right) dt - k_D \frac{d^2 x}{dt^2}. \quad (3.116)$$

Врахуємо подібні доданки у (3.116) з урахуванням початкових умов (3.75):

$$a_2 \frac{d^3 x}{dt^3} + (a_1 + k_D) \frac{d^2 x}{dt^2} + (a_0 + K_D + k_P) \frac{dx}{dt} + (K_P + k_I) x = u(t) + k_P v_W + k_I v_W t + k_I (S_0 - S_f) - K_I \int x(t) dt. \quad (3.117)$$

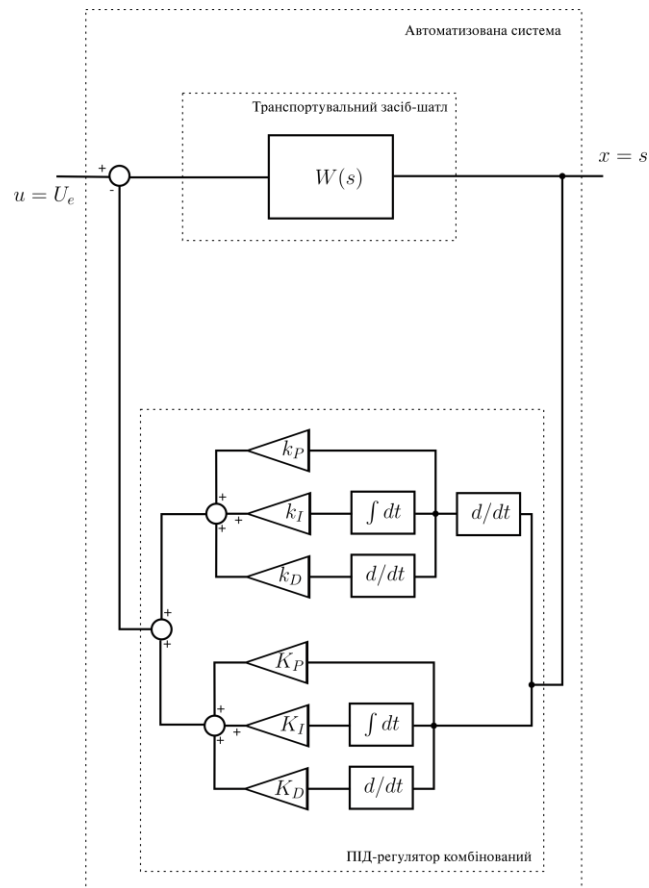


Рисунок 3.8 – Структурна схема автоматизованої системи транспортувального засоба-шатла із автоматичним ПІД- регулятором комбінованим лінійним

Щоб представити співвідношення (3.117) у більш зручному вигляді введемо до розгляду нову змінну (3.50), завдяки якій співвідношення (3.117):

$$\begin{aligned} a_2 \frac{d^4 \tilde{x}}{dt^4} + (a_1 + k_D) \frac{d^3 \tilde{x}}{dt^3} + (a_0 + K_D + k_P) \frac{d^2 \tilde{x}}{dt^2} + (K_P + k_I) \frac{d\tilde{x}}{dt} + K_I \tilde{x} = \\ = u(t) + (k_P + k_I t) v_W + k_I (S_0 - S_f). \end{aligned} \quad (3.118)$$

Диференціальне рівняння (3.118) слід розглядати із початковими умовами (3.93).

З урахуванням співвідношення (3.94) диференціальне рівняння (3.118) дозволяє отримати умову щодо напруги живлення електричних двигунів:

$$U_e(t) - \frac{R_e}{2B_e} mg\delta + (k_P + k_I t) v_W + k_I (S_0 - S_f) = 0. \quad (3.119)$$

У вигляді (3.118), (3.93), (3.119) маємо математичну модель процесу керування переміщенням та швидкістю автоматичного транспортувального засоба-шатла при перевезенні вантажу.

Саме математичну модель (3.118), (3.93) використовуватимемо далі при виконанні досліджень щодо можливостей використання ПД-регуляторів для автоматичного забезпечення заданої величини переміщення та заданої швидкості руху транспортувального засоба-шатла при перевезенні ним вантажів.

Для визначення параметрів ПД-регуляторів переміщення та швидкості, які забезпечуватимуть стійкість бажаного руху (3.118) транспортувального засоба-шатла із поточного нерухомого положення в задане інше положення при перевезенні вантажів використаємо диференціальне рівняння (3.118) та схему Рауса:

$$\begin{array}{ccc}
a_2 & a_0 + K_D + k_P & K_I \\
a_1 + k_D & K_P + k_I & \\
c_0 & K_I & \\
\frac{c_0(K_P + k_I) - (a_1 + k_D)K_I}{c_0} & & \\
K_I & & \\
\hline
c_0 = \frac{(a_1 + k_D)(a_0 + K_D + k_P) - a_2(K_P + k_I)}{a_1 + k_D}. & & (3.120)
\end{array}$$

Відповідно із виразами (3.5) маємо нерівності (3.54), з урахуванням яких та схеми Рауса (3.120) відповідно критерію Рауса маємо такі умови:

$$\begin{aligned}
a_1 + k_D &> 0, \\
(a_1 + k_D)(a_0 + K_D + k_P) - a_2(K_P + k_I) &> 0, \\
\frac{(a_1 + k_D)(a_0 + K_D + k_P) - a_2(K_P + k_I)}{a_1 + k_D}(K_P + k_I) - (a_1 + k_D)K_I &> 0, \\
K_I &> 0.
\end{aligned} \tag{3.121}$$

Умови (3.121) свідчать, що маємо можливість обирати параметри ПД-регуляторів переміщення та швидкості транспортувального засоба-шатла у досить широких межах, але при виборі таких параметрів, зрозуміло, слід також враховувати суто технічні обмеження, щоб мати керування, які можна реалізувати фізично, у тому числі без пошкоджень конструкцій та систем транспортувального засобу-шатла.

Розглянемо далі амплітудно-частотну характеристику процесу керування переміщенням та швидкістю транспортувального засобу-шатла. Перетворення Лапласа (3.19) та диференціальне рівняння (3.118) природно

приводять до представлення лінійного об'єкту автоматизації у вигляді динамічної ланки (див. рис. 3.1) із передаточною функцією:

$$W(s) = \frac{s}{a_2 s^4 + (a_1 + k_D) s^3 + (a_0 + K_D + k_P) s^2 + (K_P + k_I) s + K_I}, \quad (3.122)$$

де $W(s)$ – передаточна функція процесу керування ПІД-регулятором переміщенням та швидкістю транспортувального засобу-шатла.

Врахуємо вираз (3.22) в передаточній функції (3.122) та матимемо таке:

$$W(i\omega) = \frac{i\omega}{a_2 \omega^4 - (a_0 + K_D + k_P) \omega^2 + K_I + i(K_P + k_I - (a_1 + k_D) \omega^2) \omega}. \quad (3.123)$$

Виконаємо тотожні перетворення виразу (3.123) та отримаємо в результаті:

$$\begin{aligned} W(i\omega) &= \\ &= \omega \frac{-(K_P + k_I - (a_1 + k_D) \omega^2) \omega + i(a_2 \omega^4 - (a_0 + K_D + k_P) \omega^2 + K_I)}{(a_2 \omega^4 - (a_0 + K_D + k_P) \omega^2 + K_I)^2 + (K_P + k_I - (a_1 + k_D) \omega^2)^2 \omega^2}. \end{aligned} \quad (3.124)$$

Завдяки виразу (3.124) одразу ж маємо амплітудно-частотну характеристику процесу керування ПІД-регулятором:

$$\begin{aligned} A(\omega) &= \\ &= \frac{\omega}{\sqrt{(a_2 \omega^4 - (a_0 + K_D + k_P) \omega^2 + K_I)^2 + (K_P + k_I - (a_1 + k_D) \omega^2)^2 \omega^2}}, \end{aligned} \quad (3.125)$$

де $A(\omega)$ – амплітуда керованого параметру залежна від частоти керування.

Дослідження амплітудно-частотної характеристики (3.125) зводиться до дослідження властивостей її знаменнику, тобто функції:

$$\varphi(\varpi) = \left(a_2 \varpi^4 - (a_0 + K_D + k_p) \varpi^2 + K_I \right)^2 + \left(K_p + k_I - (a_1 + k_D) \varpi^2 \right)^2 \varpi^2. \quad (3.126)$$

Функція (3.126) представляє собою поліном восьмого ступеня вигляду:

$$\begin{aligned} \varphi(\varpi) = & a_2^2 \varpi^8 + \left((a_1 + k_D)^2 - 2a_2(a_0 + K_D + k_p) \right) \varpi^6 + \\ & + \left(a_0 + K_D + k_p + 2(a_2 K_I - (a_1 + k_D)(K_p + k_I)) \right) \varpi^4 + \\ & + \left((K_p + k_I)^2 - 2(a_0 + K_D + k_p) K_I \right) \varpi^2 + K_I^2. \end{aligned} \quad (3.127)$$

Щоб визначити стаціонарні точки функції (3.127), використаємо її похідну:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{d\varpi}(\varpi) = & 8a_2^2 \varpi^7 + 6 \left((a_1 + k_D)^2 - 2a_2(a_0 + K_D + k_p) \right) \varpi^5 + \\ & + 4 \left(a_0 + K_D + k_p + 2(a_2 K_I - (a_1 + k_D)(K_p + k_I)) \right) \varpi^3 + \\ & + 2 \left((K_p + k_I)^2 - 2(a_0 + K_D + k_p) K_I \right) \varpi. \end{aligned} \quad (3.128)$$

Стаціонарні точки функції (3.127) визначаються із умови рівності нулю першої похідної (3.128), яка приведе до значення (3.112) та значень, які задовольняють умові:

$$\begin{aligned} & 4a_2^2 \varpi^6 + 3 \left((a_1 + k_D)^2 - 2a_2(a_0 + K_D + k_p) \right) \varpi^4 + \\ & + 2 \left(a_0 + K_D + k_p + 2(a_2 K_I - (a_1 + k_D)(K_p + k_I)) \right) \varpi^2 + \\ & + \left((K_p + k_I)^2 - 2(a_0 + K_D + k_p) K_I \right) = 0. \end{aligned} \quad (3.129)$$

Як свідчить рівняння (3.129), у випадку дійсного кореня ϖ^2 матимемо три резонансних частоти, тому для уникнення таких явищ слід задовольнити:

$$\operatorname{Im}(\varpi^2) \neq 0, \quad (3.130)$$

де ϖ^2 – корінь рівняння (3.129).

Маємо можливість сформулювати додаткову умову (3.130) для визначення параметрів ПД-регуляторів переміщення та швидкості, які забезпечать додаткові властивості керувань щодо уникнення резонансних явищ протягом експлуатації автоматичного транспортувального засоба-шатла. В той же час, слід зазначити, що розглянуте тут лінійне керування переміщенням із заданою швидкістю на основі сумісного використання ПД-регулятора переміщення та ПД-регулятора швидкості автоматичного транспортувального засоба-шатла має бути більш ретельно дослідженим, оскільки маємо ефект взаємовпливу умови переміщення до заданого положення для подальшої зупинки та умови руху із заданою сталою швидкістю.

3.4.2 Нелінійне автоматичне керування переміщенням із заданою швидкістю

Задачі забезпечення руху транспортувального засоба-шатла із заданою швидкістю та переміщення транспортувального засоба-шатла до точно заданого місця є насправді різними [104]. Розглянемо нелінійне керування автоматичним транспортувальним засобом-шатлом, в якому передбачено можливість почергового вмикання та вимикання ПД-регулятору швидкості та ПД-регулятору положення.

В якості основи для побудови математичної моделі процесу нелінійного керування переміщенням із заданою швидкістю використовуємо розглянуту вище лінійну математичну модель (3.116). Ідея запропонованого нелінійного керування рухом автоматичного транспортувального засоба-

шатла полягатиме в тому, щоб розділити у часі процеси керування рухом із точно заданою швидкістю та переміщенням у точно задане положення для подальшої зупинки. Таку ідею можливо реалізувати шляхом вимкнення ПД-регулятора швидкості та ввімкнення ПД-регулятора положення, якщо автоматичний транспортувальний засіб-шатл під'їхав до бажаного заданого положення на досить близьку величину, тобто коли величина (3.59), яка характеризує поточне положення, задовольняє умові:

$$|x(t)| \leq \Delta S_f, \quad (3.131)$$

де ΔS_f – задана величина, яка визначає область дії ПД-регулятора положення.

У відповідності умові (3.131) в деякий момент часу t свідчить про те, що автоматичний транспортувальний засіб-шатл досить близько знаходиться від заданого бажаного положення і тому в саме цей момент часу слід вимкнути ПД-регулятор швидкості та ввімкнути ПД-регулятор положення. Якщо умова (3.131) задовольняється в початковий момент часу $t = t_0$, то це свідчить про те, транспортувальний засіб-шатл досить близько до бажаного положення і тому в цьому випадку слід одразу ж ввімкнути ПД-регулятор положення для забезпечення точного позиціонування і взагалі не вмикати ПД-регулятор швидкості. З урахуванням означених обставин введемо до розгляду функцію:

$$\kappa(x, \Delta S_f) = \frac{1}{2} (|x| - \Delta S_f + ||x| - \Delta S_f|), \quad (3.132)$$

Сенс введення функції (3.132) полягає у тому, що ця функція задовольняє такій умові:

$$\kappa(x, \Delta S_f) = \begin{cases} 0, & |x| \leq \Delta S_f, \\ 1, & |x| > \Delta S_f. \end{cases} \quad (3.133)$$

Завдяки умові (3.133) функцію (3.132) можна використати для реалізації ідеї про вимкнення ПД-регулятора швидкості та і ввімкнення ПД-регулятора положення, якщо транспортувальний засіб-шатл досить близько під'їхав до бажаного заданого положення відповідно умові (3.131), що приведе до такої модифікації лінійного керування (3.117) (рис. 3.9):

$$\begin{aligned} & a_2 \frac{d^3 x}{dt^3} + a_1 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_0 \frac{dx}{dt} = \\ & = u(t) - (1 - \kappa(x, \Delta S_f)) \left(K_P x + K_I \int x(t) dt + K_D \frac{dx}{dt} \right) - \\ & - \kappa(x, \Delta S_f) \left(k_P \left(\frac{dx}{dt} - v_w \right) + k_I \int \left(\frac{dx}{dt} - v_w \right) dt + k_D \frac{d^2 x}{dt^2} \right). \end{aligned} \quad (3.134)$$

Врахуємо подібні доданки у співвідношенні (3.118) з урахуванням (3.75):

$$\begin{aligned} & a_2 \frac{d^3 x}{dt^3} + (a_1 + \kappa(x, \Delta S_f) k_D) \frac{d^2 x}{dt^2} + (a_0 + (1 - \kappa(x, \Delta S_f)) K_D + k_P) \frac{dx}{dt} + \\ & + ((1 - \kappa(x, \Delta S_f)) K_P + \kappa(x, \Delta S_f) k_I) x = \\ & = u(t) + \kappa(x, \Delta S_f) k_P v_w + \kappa(x, \Delta S_f) k_I v_w t + \\ & + \kappa(x, \Delta S_f) k_I (S_0 - S_f) - (1 - \kappa(x, \Delta S_f)) K_I \int x(t) dt. \end{aligned} \quad (3.135)$$

Щоб представити співвідношення (3.135) у більш зручному вигляді введемо до розгляду нову змінну вигляду (3.50), завдяки якій матимемо таке:

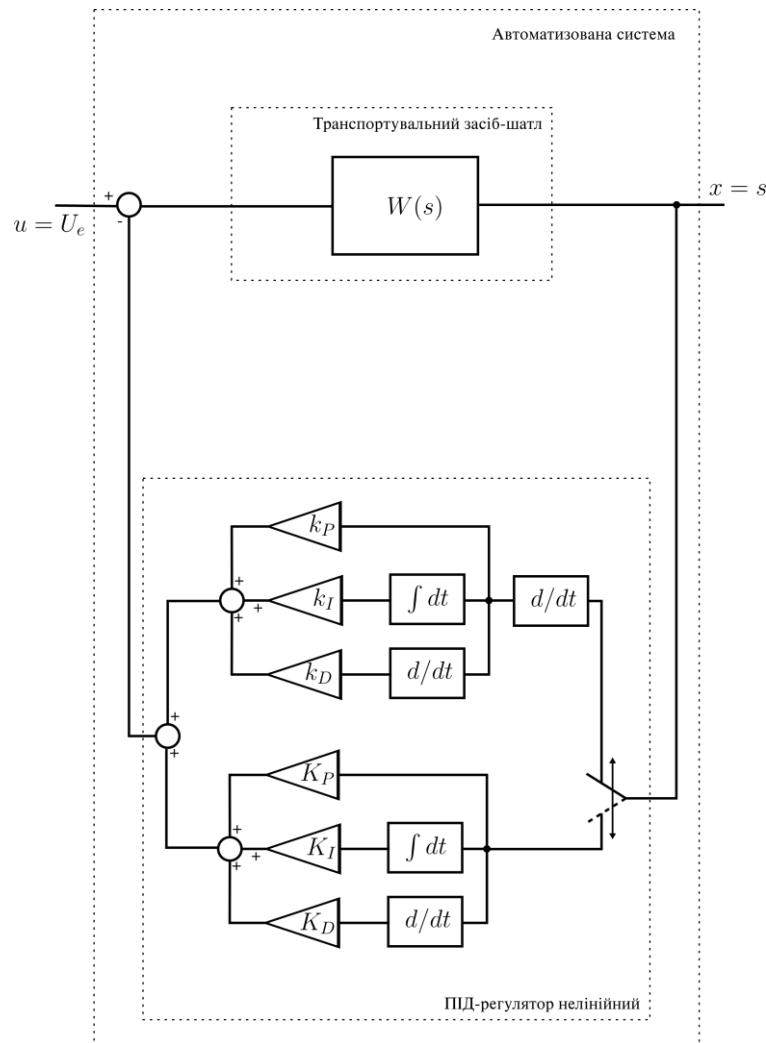


Рисунок 3.9 – Структурна схема автоматизованої системи транспортувального засоба-шатла із автоматичним ПІД- регулятором комбінованим нелінійним

$$\begin{aligned}
 & a_2 \frac{d^4 \tilde{x}}{dt^4} + (a_1 + \kappa(x, \Delta S_f) k_D) \frac{d^3 \tilde{x}}{dt^3} + \\
 & + (a_0 + (1 - \kappa(x, \Delta S_f)) K_D + \kappa(x, \Delta S_f) k_P) \frac{d^2 \tilde{x}}{dt^2} + \\
 & + \left((1 - \kappa(x, \Delta S_f)) K_P + \kappa(x, \Delta S_f) k_I \right) \frac{d\tilde{x}}{dt} + (1 - \kappa(x, \Delta S_f)) K_I \tilde{x} = \\
 & = u(t) + \kappa(x, \Delta S_f) (k_P + k_I t) v_W + \kappa(x, \Delta S_f) k_I (S_0 - S_f). \quad (3.136)
 \end{aligned}$$

Диференціальне рівняння (3.136) слід розглядати із початковими умовами (3.93), що приведе до математичної моделі процесу нелінійного керування переміщенням із заданою швидкістю. Нелінійне керування автоматичним транспортувальним засобом-шатлом відповідно диференціальному рівнянню (3.136) визначається параметрами $k_p, k_I, k_D, K_p, K_I, K_D$, а також параметром ΔS_f , отже розглянемо далі визначення цих параметрів. Для визначення параметрів k_p, k_I, k_D розглянемо диференціальне рівняння (3.123) відповідне умові:

$$|x(t)| > \Delta S_f \Rightarrow \kappa(x, \Delta S_f) = 1. \quad (3.137)$$

За умови (3.137), що диференціальне рівняння (3.136) набуде вигляду:

$$\begin{aligned} a_2 \frac{d^4 \tilde{x}}{dt^4} + (a_1 + k_D) \frac{d^3 \tilde{x}}{dt^3} + (a_0 + k_p) \frac{d^2 \tilde{x}}{dt^2} + k_I \frac{d\tilde{x}}{dt} = \\ = u(t) + (k_p + k_I t) v_w + k_I (S_0 - S_f). \end{aligned} \quad (3.138)$$

Для перетворення диференціального рівняння (3.138) введемо нову змінну:

$$\frac{d\tilde{x}}{dt} = \hat{x} + v_w t + S_0 - S_f, \quad (3.139)$$

де \hat{x} – нова змінна.

Завдяки новій змінній \hat{x} (3.139) диференціальне рівняння (3.138):

$$a_2 \frac{d^3 \hat{x}}{dt^3} + (a_1 + k_D) \frac{d^2 \hat{x}}{dt^2} + (a_0 + k_p) \frac{d\hat{x}}{dt} + k_I \hat{x} = u(t) - a_0 v_w. \quad (3.140)$$

Якщо врахувати вираз (3.94) та диференціальне рівняння (3.140) повністю співпадає із диференціальним рівнянням (3.51) математичної моделі керування швидкістю. Завдяки цьому маємо, що параметри k_p , k_I , k_D мають задовольняти раніше отриманим умовам (3.55). Для визначення параметрів K_p , K_I , K_D розглянемо диференціальне рівняння (3.139) відповідне умові:

$$|x(t)| > \Delta S_f \Rightarrow \kappa(x, \Delta S_f) = 1. \quad (3.141)$$

За умовою (3.141) диференціальне рівняння (3.136) набуде вигляду:

$$a_2 \frac{d^4 \tilde{x}}{dt^4} + a_1 \frac{d^3 \tilde{x}}{dt^3} + (a_0 + K_D) \frac{d^2 \tilde{x}}{dt^2} + K_p \frac{d\tilde{x}}{dt} + K_I \tilde{x} = u(t). \quad (3.142)$$

Диференціальне рівняння (3.142) повністю співпадає із диференціальним рівнянням (3.18) математичної моделі керування транспортувальним переміщенням. Завдяки цьому маємо, що параметри K_p , K_I , K_D мають задовольняти раніше отриманим умовам (3.102).

Визначення параметру ΔS_f є складною задачею і пропонується здійснювати на основі комп'ютерного моделювання процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі відповідно математичній моделі у вигляді нелінійного диференціального рівняння (3.12) із початковими умовами (3.93).

3.5 Висновки за третім розділом

В якості узагальнених підсумків даного розділу можемо сказати наступне. На основі використання технологій ПІД-регуляторів було

розроблено математичні моделі засобів автоматизації для забезпечення автоматичного функціонування транспортувального засоба-шатла, а саме для забезпечення його руху із точно заданою швидкістю та для забезпечення його точно заданого переміщення для точного позиціонування відносно складників логістичної системи. Отримано умови стійкості, яким мають задовольняти параметри ПІД-регуляторів положення та швидкості для забезпечення належного перевезення вантажів автоматичним транспортувальним засобом-шатлом.

Розроблено та описано структурну схему системи керування рухом транспортувального засобу-шатлу та алгоритм роботи.

Побудовано математичну модель автоматичного керування швидкістю транспортувального засоба-шатла з використанням ПІД-регулятора у вигляді звичайного лінійного диференціального рівняння третього порядку із відповідним початковими умовами. Досліджено амплітудно-частотну характеристику процесу керування швидкістю та показано можливість наявності резонансних режимів, отримано умови, яким мають задовольняти параметри конструкцій та ПІД-регулятора швидкості транспортувального засобу-шатла, щоб уникнути резонансних процесів протягом експлуатації.

Побудовано математичну модель автоматичного керування переміщенням транспортувального засоба-шатла з використанням ПІД-регулятора у вигляді лінійного диференціального рівняння четвертого порядку із відповідним початковими умовами.

Досліджено амплітудно-частотну характеристику процесу керування переміщенням та показано можливість резонансних режимів, отримано умови, яким мають задовольняти параметри конструкцій та ПІД-регулятора переміщення транспортувального засобу-шатла, щоб уникнути резонансних процесів протягом життєвого циклу.

Побудовано математичну модель автоматичного лінійного керування переміщенням із заданою швидкістю транспортувального засоба-шатла з

сумісним використанням ПД-регуляторів положення та швидкості у вигляді звичайного лінійного диференціального рівняння четвертого порядку із відповідним початковими умовами. Досліджено амплітудно-частотну характеристику процесу керування переміщенням із заданою швидкістю та показано можливість наявності резонансних режимів, отримано умови, яким мають задовольняти параметри конструкцій та ПД-регуляторів переміщення і швидкості транспортувального засобу-шатла, щоб уникнути резонансних процесів протягом експлуатації. Також побудовано математичну модель нелінійного керування переміщенням із заданою швидкістю транспортувального засобу-шатла з сумісним використанням ПД-регуляторів положення та швидкості, в якій передбачено можливість почергового вмикання та вимикання цих регуляторів за умовою наближення транспортувального засобу-шатла до бажаного положення зупинки.

Показано, що параметри ПД-регуляторів швидкості та положення, які використовуються в нелінійному законі керування, мають задовольняти тим самим умовам, що й окремі ПД-регулятори швидкості та положення, я визначення параметра, за яким має здійснюватися вмикання та вимикання цих регуляторів, пропонується здійснювати на основі комп'ютерного моделювання процесів.

Перелік використаних джерел у даному розділі наведено у повному списку використаних джерел під номерами: [8, 21, 24, 31, 53, 56-60, 90, 78-104].

Матеріали цього розділу опубліковано в роботах автора [2, 3, 5, 7, 8, 9, 10, 14, 16, 17], що наведено в додатку И.

4 ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ АВТОМАТИЧНИМ ТРАНСПОРТУВАЛЬНИМ ЗАСОБОМ-ШАТЛОМ

4.1 Загальні підходи інтелектуалізації керування автоматичним транспортувальним засобом-шатлом

Впровадження автоматичних транспортувальних засобів-шатлів надає значні переваги складським логістичним системам через можливості забезпечення більшої швидкодії керування завдяки виключенні людини оператора. Керування автономними транспортувальним засобом-шатлом має бути узгоджене із завданнями внутрішньо-складської логістичної системи [105-111].

Можливості традиційних технологій автоматизації, що базуються на використанні регуляторів, є досить обмеженими та дозволяють лише керувати окремими параметрами стану автоматичних транспортувальних засобів-шатлів. Для забезпечення ефективної роботи складської логістичної системи, із автономними транспортувальними засобами-шатлами, досить привабливим є використання інтелектуальних систем, заснованих на оптимізації виробничих процесів з використанням комп'ютерних технологій. Інтелектуалізація систем автоматизації складських логістичних систем може бути здійснена на основі використання відповідних комп'ютерних технологій та потребує наявності додаткових складних компонент у вигляді відповідного математичного та програмного забезпечення.

Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем автоматизації має бути відповідним чином розробленим у повній узгодженості із бажаними характеристиками складської логістичної системи.

Складності створення таких інтелектуальних систем автоматизації обумовлені необхідністю їхнього узгодження із властивостями фізичних

компонентів внутрішньо складських логістичних систем, яким природно притаманні різноманітні недосконалості та які знаходяться під впливом великої кількості різноманітних зовнішніх факторів що не можуть бути точно передбаченими заздалегідь.

Обмеженості традиційних підходів щодо керування складськими логістичними системами на основі використання автоматичних регуляторів обумовлені великою кількістю контрольованих параметрів стану та обмежень на них, що значно ускладнює узгодження цих параметрів між собою протягом експлуатації [8].

Деякі із параметрів, що характеризують ефективність роботи складських логістичних систем, не можуть бути ні виміряними датчиками ні підрахованими за допомогою заданих формул, а можуть бути визначеними лише шляхом комп'ютерної симуляції відповідних процесів на основі математичного моделювання, і це також істотно обмежує можливості автоматизованих систем керування, які базуються на регуляторах [21, 26, 53]. Вкрай перспективним насправді є впровадження інтелектуальних систем керування складськими логістичними системами [58], які дозволяють враховувати взаємодію між їхніми компонентами з урахуванням обмежень на параметри їхнього стану.

4.1.1 Узгоджене керування автоматичним транспортувальним засобом-шатлом

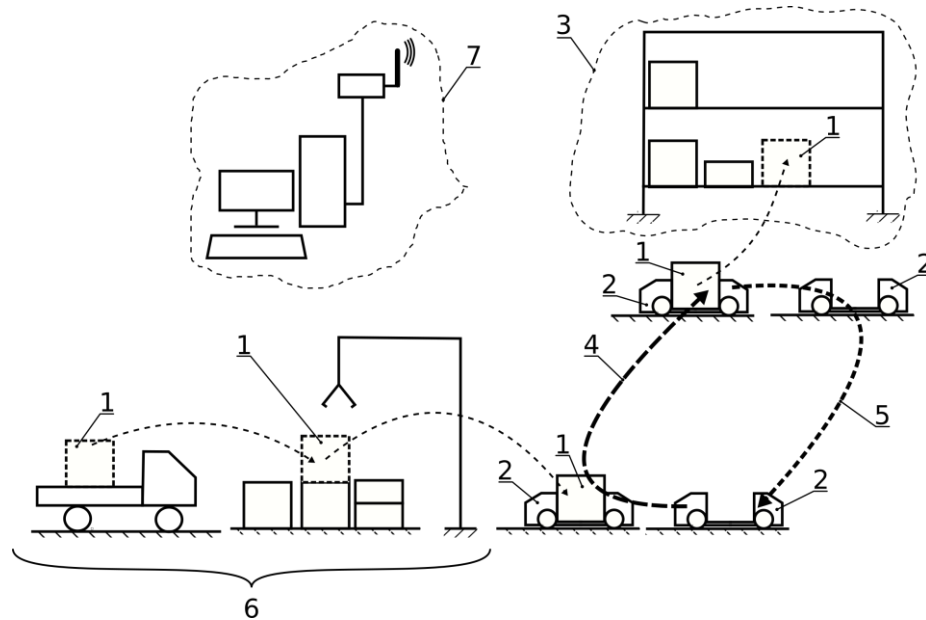
Одним із призначень складської логістичної системи є належне транспортування вантажів між зовнішніми транспортувальними засобами та складськими стелажми, і автоматичні транспортувальні засоби-шатли відіграють в цьому процесі вирішальну роль (рис. 4.1). Дійсно (рис. 4.1), вантаж -1 після належних вантажопідйомних робіт має бути доставленим за допомогою автоматичного транспортувального засоба-шатла -2 до складського стелажа -3 за складним маршрутом транспортування -4.

Зрозуміло, що для здійснення транспортування вантажів також необхідно забезпечувати повернення -5 порожнього автоматичного транспортувального засоба-шатла -2 до майданчику -6 для вантажопідйомних робіт (рис. 4.1) на зовнішньому транспорті. Процес транспортування вантажів автоматичним транспортувальним засобом-шатлом має належним чином відслідковуватися внутрішньо-складською логістичною системою таким чином, щоб положення вантажа -1 на стелажі було відповідним чином зафіксоване для подальшого поводження з ним.

Складність транспортування -4 (рис. 4.1) вантажів та виконання операції повернення -5 порожнього або навантаженого автоматичного транспортувального засоба-шатла від складських стелажів -3 до місця розташування майданчика -6 для вантажопідйомних робіт обумовлена тими обставинами, що при достатньо великій довжині цього транспортування має забезпечуватися висока точність позиціонування автоматичного транспортувального засоба-шатла наприкінці його руху для належного узгодження роботи різних складників внутрішньо-складської логістичної системи щодо поводження із вантажами, що транспортуються в її межах. При цьому, слід підтримувати належну швидкість автоматичного транспортувального засоба-шатла для уникнення пошкоджень складників внутрішньо-складської логістичної системи, самого автоматичного транспортувального засоба-шатла та транспортованих вантажів [90].

Належна фіксація поточного стану внутрішньо-складської логістичної системи є ключовим фактором, який забезпечуватиме її роботу при значно обмеженому втручанні людей-працівників, що дозволить скоротити час реакції на виконання завдань, а також інші техніко-економічні показники ефективності експлуатації. Забезпечення належної фіксації поточного стану внутрішньо-складської логістичної системи зводиться до фіксації розташування кожного вантажу на складських стелажах -3 та на майданчику -6 вантажопідйомних робіт на зовнішньому транспорті, а також поточного

положення автоматичного транспортувального засоба-шатла -2 для формування завдань щодо транспортування -4 вантажів та позиціонування -5 автоматичного транспортувального засоба-шатла (рис. 4.1).



- 1 –вантаж, 2 – автоматичний транспортувальний засіб-шатл; 3 – складські стелажі;
 4 – транспортування вантажів автоматичним транспортувальним засобом-шатлом;
 5 – повернення автоматичного транспортувального засоба-шатла;
 6 – майданчик для вантажопідйомних робіт на зовнішньому транспорті
 7 – система керування на основі цифрових технологій

Рисунок 4.1 – Автоматичний транспортувальний засіб-шатл в логістичній системі

Найбільш зручним для цього є використання цифрових технологій, у тому числі різноманітних мережевих рішень із різними способами передачі даних між складовими складської логістичної системи, що можуть бути розташовані стаціонарно на досить великих відстанях та рухатись в межах складського господарства (рис. 4.1). Отже (рис. 4.1), система керування -7

складської логістичної системи має бути оформлена окремо у вигляді відповідного комп'ютерного устаткування, яке має включати сервери та робочі станції, а також локальні користувальницькі термінали та пристрої, що об'єднані комп'ютерними мережами, у тому числі мобільними. Завдяки використанню цифрових технологій в системі керування -7 (рис. 4.1) маємо можливість не тільки здійснювати фіксацію поточного стану складської логістичної системи, але також й оцінювати стратегії її експлуатації відповідно до її поточного стану з урахуванням різноманітних техніко-економічних показників та критеріїв ефективності. Завдяки цьому керування складською логістичною системою буде інтелектуальним, тобто буде змінюватися відповідно до поточного стану та поточних завдань з урахуванням бажаних критеріїв ефективності.

Основним показником складської логістичної системи, є пропускна спроможність – забезпечення системою за заданий час потрібних обсягів транспортування вантажів. Пропускна спроможність складської логістичної системи (див. рис. 4.1) обмежується багатьма факторами, але найголовнішим із них є швидкість руху автоматичного транспортувального засоба-шатла між майданчиком -6 для вантажопідйомних робіт на зовнішньому транспорті та складськими стелажми -3 (див. рис. 4.1). Дійсно, час, який необхідно витратити на перевезення вантажів, накопичених на майданчику -6 для вантажопідйомних робіт на зовнішньому транспорті, до складських стелажів -3, залежить відповідним чином від швидкості руху транспортувального засоба-шатла при транспортуванні -4 та при поверненні -5 за іншим вантажем (див. рис. 4.1).

На перший погляд здається, що для внутрішньо-складської логістичної системи завжди краще забезпечувати як можна більшу швидкість руху автоматичного транспортувального засоба-шатла.

Але насправді це не так, оскільки окрім пропускної спроможності досить важливими характеристиками внутрішньо-складської логістичної

системи є також інші техніко-економічні показники її експлуатації, енергоефективність у тому числі. З урахуванням означеної обставини, слід враховувати, що енерговитрати, які потрібні на транспортування вантажу автоматичним транспортувальним засобом-шатлом, істотно залежать від швидкості руху. Для ілюстрації такої залежності розглянемо енерговитрати щодо транспортування вантажу на ділянці прямолінійного руху автоматичного транспортувального засоба-шатла із заданою сталою швидкістю (рис. 4.2). Відповідно до теореми про зміну кінетичної енергії механічної системи маємо (рис. 4.2):

$$F_e S - F_\delta S - F_v S = 0, \quad (4.1)$$

де F_e – узагальнена сила, яка відповідає електромагнітному моменту рушійних електричних двигунів; F_δ – узагальнена сила, яка відповідає моменту тертя кочення коліс; F_v – узагальнена сила, яка відповідає в'язкому опору руху; S – довжина ділянки рівномірного прямолінійного руху.

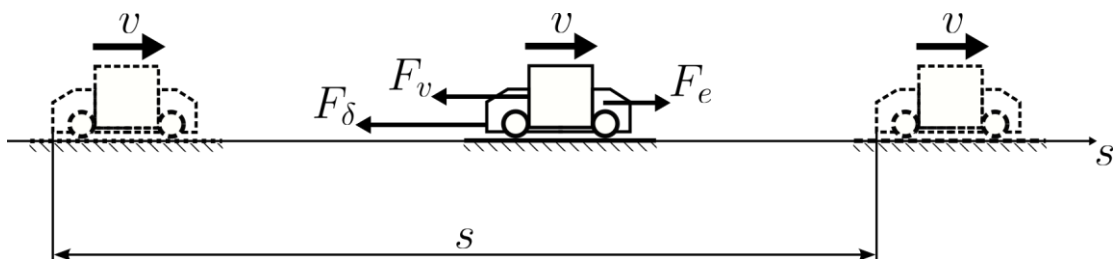


Рисунок 4.2 – Рівномірний прямолінійний рух автоматичного транспортувального засобу-шатла

Рівність нулю (4.1) обумовлена тим, що автоматичний транспортувальний засіб-шатл рухається із заданою сталою швидкістю, та має однакову кінетичну енергію на початку та в момент завершення ділянки прямолінійного руху (рис. 4.2). Оскільки, розглядаємо рівномірний рух

автоматичного транспортувального засоба-шатла на прямолінійній ділянці (рис. 4.2), то вважаємо, що усі діючі сили є сталими, що дає можливість підрахувати роботу цих сил (4.1). Зрозуміло, що транспортування вантажу (рис. 4.2) потребує відповідної витрати електричної енергії:

$$A_e = F_e S, \quad (4.2)$$

де A_e – електрична енергія, яку потрібно використати для забезпечення транспортування вантажу автоматичним транспортувальним засобом-шатлом із заданою сталою швидкістю на прямолінійній ділянці маршруту.

Співвідношення (4.1) та визначення (4.2) свідчать, що протягом транспортування вантажів автоматичним транспортувальним засобом-шатлом на прямолінійній ділянці із сталою швидкістю електрична енергія витрачається фактично на подолання сил в'язкого опору та тертя кочення коліс:

$$A_e = F_\delta S + F_v S. \quad (4.3)$$

Замість абсолютної величини (4.3) більш зручна питома величина:

$$A_e^{(s)} = \frac{A_e}{S}, \quad (4.4)$$

де $A_e^{(s)}$ – питома витрата електричної енергії автоматичним транспортувальним засобом-шатлом на одиницю довжини шляху транспортування вантажу зі сталою швидкістю.

Завдяки результату (4.3) матимемо величину (4.4) у такому вигляді:

$$A_e^{(s)} = F_\delta + F_v. \quad (4.5)$$

Для оцінки величини (4.5) слід визначити сили в'язкого опору та тертя кочення коліс, що діють на автоматичний транспортувальний засіб-шатл. Оскільки швидкості автоматичних транспортувальних засобів-шатлів внутрішньо-складської логістичної системи відносно невеликі, то вважаємо, що сила в'язкого опору:

$$F_v = b_v v, \quad (4.6)$$

де b_v – числовий параметр, який залежить від конструкції автоматичного транспортувального засоба-шатла та її параметрів та визначає сили в'язкого опору.

Оскільки момент тертя кочення коліс пропорційний силі тиску коліс на опорну поверхню, то узагальнена сила, яка відповідає моменту тертя кочення коліс, пропорційна повній масі автоматичного транспортувального засоба-шатла:

$$F_\delta = b_\delta m, \quad (4.7)$$

де b_δ – числовий параметр, який визначає силу тертя кочення коліс та залежить від конструкції автоматичного транспортувального засоба-шатла та її параметрів; m – повна маса автоматичного транспортувального засоба-шатла.

З урахуванням співвідношень (4.6) та (4.7) маємо оцінку використання електроенергії (4.5) автоматичним транспортувальним засобом-шатлом:

$$A_e^{(s)} = b_\delta m + b_v v. \quad (4.8)$$

Результат (4.8) представлений на рис. 4.3. Бачимо, що зі збільшенням повної маси та швидкості руху автоматичного транспортувального засоба-шатла будуть зростати питома витрата електроенергії на перевезення вантажу. Зрозуміло, що повна маса автоматичного транспортувального засоба-шатла значною мірою залежить, насамперед, від маси транспортованого вантажу, але вона також містить й власну масу самого транспортувального засоба-шатла.

Отже, завдяки означеним обставинам оптимізація проектування конструкцій автоматичного транспортувального засоба-шатла для зменшення його власної маси сприятиме певної економії електричної енергії та за рахунок цього підвищуватиме ефективність експлуатації внутрішньо-складської логістичної системи.

Також слід зазначити, що одержане співвідношення (4.8), яке представлено на рис. 4.3, свідчить про можливість контролювати використання електроенергії внутрішньо-складською логістичною системою за рахунок належного вибору швидкості руху автоматичного транспортувального засоба-шатла.

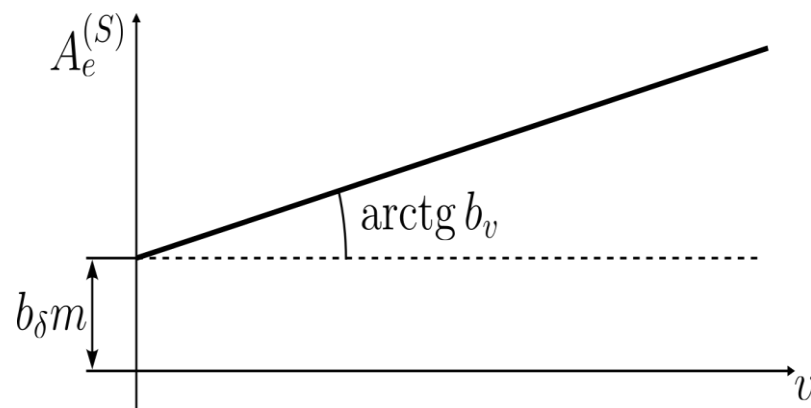


Рисунок 4.3 – Питома витрата електроенергії на перевезення вантажу автоматичним транспортувальним засобом-шатлом

4.1.2 Інтелектуалізація керування автоматичним транспортувальним засобом-шатлом

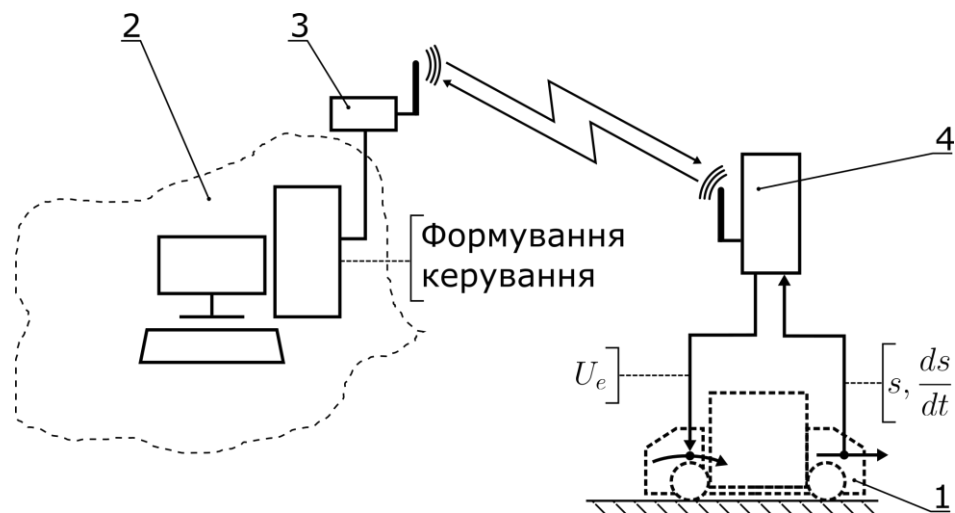
Впровадження інтелектуальних систем є одним із підходів щодо забезпечення узгодженості керування автоматичними транспортувальними засобами-шатлами із поточними завданнями складської логістичної системи. Узгодженість керування автоматичними транспортувальними засобами-шатлами -1 із поточними завданнями складських логістичних систем має гуртуватись на складних алгоритмах формування команд керування, які програмно реалізуються на промислових стаціонарних комп'ютерах системи керування -2, як показано на рис. 4.4. Обмін даних та передача команд керування від системи управління -2 до транспортувального засоба-шатла здійснюється дистанційно за допомогою стаціонарного роутеру -3 та бортового роутеру -4, що встановлений на автоматичному транспортувальному засобі-шатлі (рис. 4.4).

Система керування -2 отримує данні від сенсорів, що встановлені на складових складської логістичної системи, а не тільки від бортових сенсорів автоматичного транспортувального засоба-шатла, як показано на рис. 4.4, отже формування команд керування автоматичним транспортувальним засобом-шатлом здійснюється з урахуванням даних щодо поточного стану складської логістичної системи в цілому, а не тільки щодо поточного стану самого автоматичного транспортувального засоба-шатла, як це притаманно традиційним засобам автоматизації на основі ПД-регуляторів.

Інтелектуалізація керування забезпечується використанням комп'ютерних технологій, які дозволяють програмно реалізовувати складні алгоритми формування керувань та здійснювати досить швидкий обмін великими обсягами даних.

Інтелектуальні системи можна представляти просто як звичайний регулятор, який встановлений віддалено від об'єкта управління та керує ним дистанційно (рис. 4.4) та може реалізовувати більш складні алгоритми

формування керувань, ніж традиційний ПД-регулятор. На рис. 4.4 бачимо, що сигнал, який містить інформацію про поточний стан автоматичного транспортувального засоба-шатла -1 за допомогою бортового роутеру -4 передається по бездротовим каналам зв'язку до стаціонарного роутеру -3 системи керування -2, яка за цими даними формує сигнал керування, який передається за допомогою стаціонарного роутеру -3 на бортовий роутер -4 автоматичного транспортувального засоба-шатла у вигляді форми сигналу напруги живлення рушійних електричних двигунів.



1 – автоматичний транспортувальний засіб-шатл; 2 – система керування;

3 – стаціонарний роутер системи керування;

4 – бортовий роутер автоматичного транспортувального засобу-шатла

Рисунок 4.4 – Дистанційне безпосереднє керування автоматичним транспортувальним засобом-шатлом в логістичній системі

Якщо формування сигналу керування здійснювати відповідно закону регулювання ПД-регулятора, то така система буде просто відтворювати такий звичайний ПД-регулятор. Саме можливість реалізації складних алгоритмів формування сигналів управління є перевагою цифрових систем

керування (див. рис. 4.4), та саме такі переваги надають можливостей щодо інтелектуалізації керування.

Дистанційне пряме керування з використанням інтелектуальних систем (див. рис. 4.4) дозволяє спростити бортові системи автоматизації автоматичних транспортувальних засобів-шатлів -1, які можна звести виключно до виконавчих пристроїв, що відпрацьовують сигнали керування. Завдяки спрощенню бортових систем керування можна досягти зменшення маси автоматичного транспортувального засоба-шатла -1 (див. рис. 4.4), що відповідно виразу (4.8) дозволить зменшити витрати електроенергії на транспортування вантажів. З іншого боку, безпосереднє дистанційне керування (див. рис. 4.4) рухом автоматичного транспортувального засоба-шатла -1 значно ускладнює власне систему керування -2 та потребує дуже надійних каналів бездротового зв'язку.

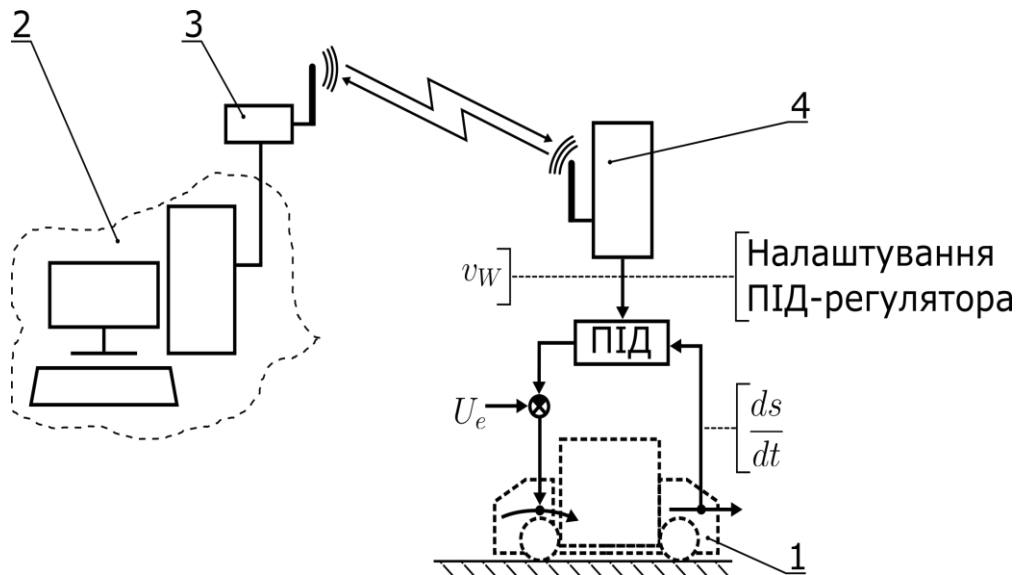
За цих умов досить перспективним є поєднання інтелектуальних систем автоматизації із системами автоматизації, що базується на використанні регуляторів, яка обумовлена можливостями використання переваг, які окремо притаманні власно інтелектуальним системами автоматизації та системам автоматизації, що базується на використанні регуляторів.

Таке поєднання може бути реалізовано шляхом непрямого керування автономними транспортувальними засобами-шатлами [57] через зміну налаштувань їхніх бортових ПД-регуляторів, що для ПД-регулятора швидкості показано на рис. 4.5.

Ефект інтелектуалізації при непрямому керуванні автоматичними транспортувальними засобами-шатлами обумовлений тим, що налаштування бортових ПД-регуляторів визначаються системою керування (див. рис. 4.5) у залежності від поточного стану та завдань складської логістичної системи.

Таким чином, можна, наприклад, змінити величину v_w бажаної швидкості руху автоматичного транспортувального засоба-шатла з

урахуванням обсягів завдань для економії використовуваної електричної енергії (4.8), як це показано вище на рис. 4.5.



- 1 – автоматичний транспортувальний засіб-шатл; 2 – система керування;
 3 – стаціонарний роутер системи керування; 4 – бортовий роутер
 автоматичного транспортувального засобу-шатла

Рисунок 4.5 – Дистанційне непряме керування автоматичним транспортувальним засобом-шатлом в логістичній системі

Дослідження автоматичного транспортувального засоба-шатла як об'єкту автоматизації у випадку реалізації дистанційного непрямого керування (див. рис. 4.5) має включати в себе в тому чи іншому вигляді сигнали керування від системи керування та перехідні процеси внаслідок зміни налаштувань бортових ПІД-регуляторів.

Отже, складності впровадження інтелектуальних систем керування складськими логістичними системами обумовлені, насамперед, необхідністю розгляду таких систем виключно у цілому для належного врахування взаємодії присутніх в них окремих компонент різного призначення, насамперед рухомих автоматичних транспортувальних засобів-шатлів.

4.2 Математичне забезпечення інтелектуалізації керування автоматичними транспортувальними засобами-шатлами

Поточні завдання внутрішньо-складської логістичної системи визначаються працівниками-операторами або на основі експертних оцінок, або на основі оптимізації завдань відомостей про додаткової інформації, що одержана з використанням допоміжних засобів оптимізації на основі комп'ютерного моделювання відповідних процесів [112]. Прогнозування техніко-економічних показників для прийняття рішень щодо подальшої зміни стану системи відповідно до її поточного стану істотно ґрунтується на комп'ютерному моделюванні процесів складських логістичних систем, а таке моделювання у свою чергу базується на математичних моделях відповідних процесів [113-115]. Розглянемо складові математичного забезпечення складських логістичних систем щодо мінімізації витрат електричної енергії.

4.2.1 Обсяги вантажів та швидкості внутрішньо-складського транспортування

Зрозуміло, що час виконання транспортних операцій при поводженні із вантажами для складської логістичної системи (див. рис. 4.1.) визначається, значною мірою швидкістю руху автоматичних транспортувальних засобів-шатлів. Для зменшення часу виконання транспортних операцій при поводженні із вантажами слід забезпечувати найбільшу швидкість руху автоматичних транспортних шатлів. Однак, як свідчить вираз (4.8) питомі на одиницю довжини шляху витрати електроенергії автоматичними транспортувальними засобами-шатлами збільшуються при збільшенні його повної маси та швидкості руху. За цих умов доцільно запровадити інтелектуальне керування, яке б забезпечувало вибір оптимальної швидкості руху автоматичного транспортувального засоба-шатла відповідно до обсягів

завдань складської логістичної системи (див. рис. 4.1) таким чином, щоб мінімізувати витрати електричної енергії на транспортування вантажів.

Математичне забезпечення щодо інтелектуального керування для узгодження швидкості автоматичного транспортувального засоба-шатла наявними завданнями внутрішньо-складської логістичної системи зводиться до визначення співвідношення:

$$\Psi(N, \tau, v) = 0, \quad (4.9)$$

де N – кількість вантажів, що мають бути транспортованими; τ – час на транспортування вантажів; v – швидкість автоматичного транспортувального засоба-шатла; $\Psi(\dots)$ – деяка функція, що залежить від таких факторів як довжина транспортувальних маршрутів та часу завантаження й розвантаження автоматичного транспортувального засоба-шатла.

У співвідношенні (4.9) враховано, що автоматичний транспортувальний засіб-шатл (див. рис. 2.1) призначений для перевезення окремих пакованих вантажів, отже обсяг завдань внутрішньо-складської логістичної системи має визначатися саме кількістю N пакованих вантажів, які мають бути транспортованими за бажаний час τ . Зрозуміло, що транспортування N пакованих вантажів за бажаний час τ вимагає певної швидкості v руху автоматичного транспортувального засоба-шатла, отже величини N , τ та v мають бути зв'язані, і такий зв'язок власне й визначається співвідношенням (4.9). Завдяки співвідношенню (4.9) маємо можливість визначати швидкість руху автоматичного транспортувального засоба-шатла, відповідну обсягу вантажів та бажаному часу транспортування, а також оцінювати час, потрібний для транспортування заданого обсягу

вантажів із заданою швидкістю руху автоматичного транспортувального засоба-шатла, що математично записується у вигляді:

$$v = \psi_v(N, \tau), \quad (4.10)$$

$$\tau = \psi_\tau(N, v), \quad (4.11)$$

де $\psi_v(\dots)$ та $\psi_\tau(\dots)$ – деякі функції, що відповідним чином визначаються через функцію $\Psi(\dots)$ із співвідношення (4.9).

Функції $\psi_v(\dots)$ та $\psi_\tau(\dots)$, що визначають співвідношення (4.10) та (4.11), мають задовольняти таким умовам:

$$\Psi(N, \tau, \psi_v(N, \tau)) \equiv 0, \quad \Psi(N, \psi_\tau(N, v), v) \equiv 0. \quad (4.12)$$

Зрозуміло, що не завжди матимемо співвідношення (4.10) та (4.11) у явному вигляді, але завжди можемо визначити швидкість (4.10) та час (4.11) за допомогою обчислювальних методів при розв'язуванні відповідних рівнянь, що породжуються співвідношенням (4.9). При плануванні операцій транспортування вантажів внутрішньо-складською логістичною системою слід враховувати наявну обмеженість максимальної швидкості автоматичного транспортувального засоба-шатла:

$$\psi_v(N, \tau) > v_{\max} \Rightarrow v = v_{\max}, \quad \tau = \tau_{\min}, \quad \tau_{\min} = \psi_\tau(N, v_{\max}), \quad (4.13)$$

де v_{\max} та τ_{\min} – максимальна швидкість руху автоматичного транспортувального засоба-шатла та мінімальний час, потрібний для транспортування вантажів обсягом N складською логістичною системою.

Таким чином, допустима конструкцією максимально можлива швидкість v_{\max} автоматичного транспортувального засоба-шатла обмежує пропускну здатність складської логістичної системи, оскільки відповідно до співвідношення (4.13) визначає мінімальний час τ_{\min} , транспортної операції.

Вигляд функції $\Psi(\dots)$ із (4.9) залежить від поточного стану складської логістичної системи, маршрутів й послідовності транспортування. Визначення вигляду функції $\Psi(\dots)$ є основним призначенням математичного забезпечення щодо інтелектуального керування. Побудова співвідношення (4.9) у загальному випадку є досить складною задачею, отже обмежимося долі розглядом досить типової ситуації транспортування вантажів від майданчику для вантажопідйомних робіт на зовнішньому транспорті до складських стелажів (див. рис. 4.1).

В такій ситуації маємо можливість представити функцію $\Psi(\dots)$, що визначає співвідношення (4.9), у такому наближеному вигляді:

$$\Psi(N, \tau, v) \approx \sum_{k=1}^N \left(t_k^{(L)} + t_k^{(U)} + \frac{2S_k}{v} \right) - \tau, \quad (4.14)$$

де $t_k^{(L)}$, $t_k^{(U)}$ та S_k – час завантаження, розвантаження та довжина маршруту транспортування від майданчику для вантажопідйомних робіт на зовнішньому транспорті до складських стелажів для вантажу з номером $k = 1, 2, \dots, N$.

Наближеність співвідношення (4.14) обумовлено тією обставиною, що в ньому не враховано час маневрування автоматичного транспортувального засоба-шатла в межах майданчика для вантажопідйомних робіт на зовнішньому транспорті. Наближено визначена функція (4.14), та умова (4.9)

дозволяють визначити $\psi_v(\dots)$ та $\psi_\tau(\dots)$, що визначають співвідношення (4.10) та (4.11):

$$\psi_v(N, \tau) \approx 2 \sum_{k=1}^N S_k / \left(\tau - \sum_{k=1}^N (t_k^{(L)} + t_k^{(U)}) \right), \quad (4.15)$$

$$\psi_\tau(N, v) \approx \sum_{k=1}^N \left(t_k^{(L)} + t_k^{(U)} + \frac{2S_k}{v} \right). \quad (4.16)$$

Завдяки виразам (4.15), (4.16) та співвідношенням (4.10), (4.11), (4.13) маємо можливість визначити швидкість автоматичного транспортувального засоба-шатла, для виконання транспортувальної операції за заданий час, а також та мінімальний час на виконання цієї операції:

$$v \approx \frac{2 \sum_{k=1}^N S_k}{\tau - \sum_{k=1}^N (t_k^{(L)} + t_k^{(U)})}, \quad (4.17)$$

$$\tau_{\min} \approx \sum_{k=1}^N \left(t_k^{(L)} + t_k^{(U)} + \frac{2S_k}{v_{\max}} \right). \quad (4.18)$$

Завдяки виразу (4.18) маємо можливість оцінити мінімальний час для виконання транспортування вантажів від майданчику для вантажопідйомних робіт на зовнішньому транспорті до складських стелажів (див. рис. 4.1), та визначити швидкість автоматичного транспортувального засоба-шатла, яка забезпечить виконання цього за заданий час $\tau > \tau_{\min}$.

4.2.2 Зменшення енерговитрат автоматичного транспортувального засоба-шатла за рахунок вибору оптимальної швидкості транспортування

Як свідчить вираз (4.8) та його графічна інтерпретація (див. рис. 4.3), питомі на одиницю довжини шляху витрати електроенергії автоматичними транспортувальними засобами-шатлами збільшуються при збільшенні його повної маси та швидкості руху. У випадку можливості вибору часу виконання транспортувальної операції $\tau > \tau_{\min}$ можемо спробувати підібрати швидкість автоматичного транспортувального засоба-шатла таким чином, щоб зменшити використання споживання їм електричної енергії при виконанні цієї транспортувальної операції.

При визначенні витрати електроенергії для транспортування вантажу від майданчику для вантажопідйомних робіт на зовнішньому транспорті до складських стелажів (див. рис. 4.1) будемо використовувати раніше отримані результати (4.4), (4.8) та враховувати, що за рахунок габаритів вантажу параметр, який визначає в'язкий опір завантаженого та порожнього автоматичного транспортувального засоба-шатла у загальному випадку є різним. Також враховуємо, що час руху автоматичного транспортувального засоба-шатла від майданчику для вантажопідйомних робіт на зовнішньому транспорті до складських стелажів та у зворотному напрямку (див. рис. 4.1) має бути заданим відповідно до завдань внутрішньо-складської логістичної системи:

$$b_v^{(1)} v_1 S + b_\delta m S + b_v^{(2)} v_2 S + b_\delta m_s S = A_e, \quad (4.19)$$

$$\frac{S}{v_1} + \frac{S}{v_2} = \tau, \quad (4.20)$$

де $b_v^{(1)}$ та $b_v^{(2)}$ – числові параметри, які визначають сили в'язкого опору для завантаженого та порожнього автоматичного транспортувального засоба-шатла; v_1 та v_2 – величини швидкості руху автоматичного транспортувального засоба-шатла від майданчику для вантажопідйомних

робіт на зовнішньому транспорті до складських стелажів та у зворотному напрямку; m та m_s – повна маса та сама порожнього автоматичного транспортувального засоба-шатла; S – відстань між майданчику для вантажопідйомних робіт на зовнішньому транспорті та складським стелажем; τ – час, встановлений внутрішньо-складською логістичною системою для транспортування вантажу від майданчику для вантажопідйомних робіт на зовнішньому транспорті до складського стелажу.

Виконаємо тотожні перетворення співвідношення (4.20):

$$S \frac{v_1 + v_2}{v_1 v_2} = \tau \Rightarrow S(v_1 + v_2) = \tau v_1 v_2 \Rightarrow v_2(\tau v_1 - S) = S v_1. \quad (4.21)$$

Завдяки останньому результату (4.21) матимемо можливість встановити зв'язок між швидкостями автоматичного транспортувального засоба-шатла, що забезпечують встановлений складською логістичною системою час τ для транспортування вантажу від майданчику для вантажопідйомних робіт на зовнішньому транспорті до складського стелажу:

$$v_2 = \frac{S v_1}{\tau v_1 - S}. \quad (4.22)$$

Врахуємо співвідношення (4.22) між швидкостями руху у різних напрямках автоматичного транспортувального засоба-шатла у співвідношенні (4.19) та завдяки цьому отримаємо оцінку використаної на виконання транспортувальної операції електричної енергії:

$$A_e = b_s(m + m_s)S + b_v^{(1)}S v_1 + b_v^{(2)} \frac{S^2 v_1}{\tau v_1 - S}. \quad (4.23)$$

Як свідчить вираз (4.23), використовувана на виконання транспортувальної операції електрична енергія досить помітно залежить від величини швидкості руху автоматичного транспортувального засоба-шатла.

Використаємо одержаний результат (4.23) для вибору оптимальної швидкості руху автоматичного транспортувального засоба-шатла, яка забезпечить мінімальне споживання електричної енергії на транспортування вантажу. Для цього розглядаємо використану електричну енергію (4.23) як функцію швидкості руху автоматичного транспортувального засоба-шатла та використаємо умову стаціонарності цієї функції:

$$\frac{dA_e}{dv_1} = 0. \quad (4.24)$$

Щоб використати умову стаціонарності (4.24), визначимо похідну (4.23):

$$\frac{dA_e}{dv_1} = b_v^{(1)}S - b_v^{(2)} \frac{S^3}{(\tau v_1 - S)^2}. \quad (4.25)$$

З урахуванням виразу (4.25) умова (4.24) у випадку $S > 0$ набуде вигляду:

$$b_v^{(1)} - b_v^{(2)} \frac{S^2}{\left(\tau v_1^{(stat)} - S\right)^2} = 0, \quad (4.26)$$

де $v_1^{(stat)}$ – величина швидкості, яка відповідає стаціонарному значенню використаної електричної енергії (4.23) як функції швидкості автоматичного транспортувального засоба-шатла.

Тотожні перетворення дозволяють представити умову (4.26) у вигляді:

$$\left(\tau v_1^{(stat)} - S\right)^2 = \frac{b_v^{(2)}}{b_v^{(1)}} S^2. \quad (4.27)$$

За допомогою співвідношення (4.27) отримаємо:

$$v_1^{(stat)} = \left(1 + \sqrt{\frac{b_v^{(2)}}{b_v^{(1)}}}\right) \frac{S}{\tau}. \quad (4.28)$$

Відповідне швидкості (4.28) стаціонарне значення використаної електричної енергії (4.23) є мінімумом за умови:

$$\frac{d^2 A_e}{dv_1^2} \left(v_1^{(stat)}\right) > 0. \quad (4.29)$$

З цією метою з урахуванням раніше отриманого результату (4.25) отримаємо другу похідну, що міститься в нерівності (4.29):

$$\frac{d^2 A_e}{dv_1^2} = \frac{2b_v^{(2)} S^2 \tau}{\left(\tau v_1 - S\right)^3}. \quad (4.30)$$

Далі підставимо значення (4.28) швидкості, яке відповідає стаціонарному значенню використаної електричної енергії (4.23), до виразу (4.30):

$$\frac{d^2 A_e}{dv_1^2} \left(v_1^{(stat)}\right) = \frac{2b_v^{(2)} S^2 \tau}{\left(\left(1 + \sqrt{\frac{b_v^{(2)}}{b_v^{(1)}}}\right) S - S\right)^3} = \frac{2b_v^{(2)} S^2 \tau}{\left(\sqrt{\frac{b_v^{(2)}}{b_v^{(1)}}} S\right)^3} > 0. \quad (4.31)$$

Результат (4.31) свідчить, що отримане значення (4.28) швидкості насправді є мінімумом використаної електричної енергії (4.23). Завдяки результату (4.31), значенню (4.28) та співвідношенню (4.22) маємо:

$$v_1^{(opt)} = \left(1 + \sqrt{\frac{b_v^{(2)}}{b_v^{(1)}}} \right) \frac{S}{\tau}, \quad v_2^{(opt)} = \left(1 + \sqrt{\frac{b_v^{(1)}}{b_v^{(2)}}} \right) \frac{S}{\tau}, \quad (4.32)$$

де $v_1^{(opt)}$ та $v_2^{(opt)}$ – оптимальні величини швидкості руху автоматичного транспортувального засоба-шатла від майданчику для вантажопідйомних робіт на зовнішньому транспорті до складських стелажів та у зворотному напрямку, що забезпечують мінімальне споживання електричної енергії для виконання відповідної транспортувальної операції за заданий час.

Оптимальні значення (4.32) швидкості автоматичного транспортувального засоба-шатла забезпечують економію електричної енергії лише за умови:

$$b_v^{(2)} \neq b_v^{(1)}. \quad (4.33)$$

При невиконанні умови (4.33) маємо такий тривіальний результат для швидкості руху автоматичного транспортувального засоба-шатла:

$$b_v^{(2)} = b_v^{(1)} \Rightarrow v_1^{(opt)} = \frac{2S}{\tau}, \quad v_2^{(opt)} = \frac{2S}{\tau}. \quad (4.34)$$

Відповідно змісту розглянутої задачі про транспортування вантажів від майданчику для вантажопідйомних робіт на зовнішньому транспорті до складських стелажів, що передбачає та повернення порожнього

автоматичного транспортувального засоба-шатла зворотному напрямку, маємо:

$$b_v^{(2)} < b_v^{(1)} \Rightarrow v_1^{(opt)} = \left(1 + \sqrt{\frac{b_v^{(2)}}{b_v^{(1)}}}\right) \frac{S}{\tau} < \frac{2S}{\tau}, \quad v_2^{(opt)} = \left(1 + \sqrt{\frac{b_v^{(1)}}{b_v^{(2)}}}\right) \frac{S}{\tau} > \frac{2S}{\tau}. \quad (4.35)$$

Як свідчить результат (4.35), економія електричної енергії транспортування вантажів забезпечена зменшеною швидкістю навантаженого, відповідним чином підвищеною швидкістю руху порожнього автоматичного транспортувального засоба-шатла для забезпечення заданого часу транспортування.

4.3 Перехідні процеси в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі при зміні налаштувань ПД-регулятора швидкості

При використанні інтелектуальних систем керування (див. рис. 4.1) впливи на стан складської логістичної системи здійснюються неперервно протягом її експлуатації.

Команди на зміну налаштувань ПД-регулятора швидкості автоматичного транспортувального засоба-шатла (див. рис. 4.5) також формуються неперервно у часі, і зміна таких налаштувань може здійснитись в будь-який момент часу та буде призводити до відповідних перехідних процесів. Такі процеси мають бути ретельно вивченими для обґрунтування нормальної та безпечної експлуатації складської логістичної системи.

4.3.1 Математична модель перехідних процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі при зміні налаштувань ПД-регулятора

Основним призначенням ПДД-регулятора швидкості, передбаченого в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі, є забезпечення виконання умови (3.7) на відповідних ділянках маршруту транспортування вантажів [60]. Величина v_w заданої бажаної швидкості автоматичного транспортувального засоба-шатла при експлуатації визначається різноманітними обставинами та може бути призначена у вигляді заданого сталого значення $v_w = const$, як це було передбачено у співвідношенні (3.7). За умов впровадження інтелектуальних систем керування може змінюватися протягом часу відповідно до поточного стану та завдань, тобто фактично є функцією часу:

$$v_w = v_w(t). \quad (4.36)$$

Розглянемо далі математичну модель автоматичного регулювання швидкості транспортувального засоба-шатла шляхом використання відповідного ПДД-регулятора для випадку (4.36) змінної у часі бажаної швидкості.

Математичну модель процесу керування швидкістю руху автоматичного транспортувального засоба-шатла будуватимемо на основі раніше отриманого результату (3.6). Для цього врахуємо, що величина v_w відповідно до співвідношення (4.36) вже не є заданим параметром, як це передбачалось у співвідношенні (3.9), яке завдяки співвідношенню (4.36) набуде вигляду:

$$v(t) = x(t) + v_w(t). \quad (4.37)$$

Врахуємо співвідношення (4.37) у диференціальному рівнянні (3.6):

$$a_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = f(t) - a_2 \frac{d^2 v_w}{dt^2} - a_1 \frac{dv_w}{dt} - a_0 v_w. \quad (4.38)$$

Диференціальне рівняння (4.38) розглядаємо із початковими умовами (3.14). У вигляді (4.38), (3.14) маємо математичну модель процесу керування швидкістю руху автоматичного транспортувального засоба-шатла. Порівняння диференціального рівняння (4.38) із (3.11), (3.10) свідчить, що швидкість (4.36) призводить до більш складних процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі, внаслідок доданків, які містять похідні функції (4.36).

Керування швидкістю автоматичного транспортувального засоба-шатла зводиться до вибору величини (4.36), тому розглядаємо керування саме як зміну величини (4.36) відносно її значення у початковий момент часу:

$$u(t) = v_w(t) - v_w(t_0), \quad (4.39)$$

де $u(t)$ – параметр керування автоматичним транспортувальним засобом-шатлом, яке здійснюється через зміну налаштувань ПД-регулятора.

З урахуванням керування (4.39) для рівняння (4.38) матимемо таке:

$$a_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = f(t) - a_0 v_w(t_0) - a_2 \frac{d^2 u}{dt^2} - a_1 \frac{du}{dt} - a_0 u. \quad (4.40)$$

Відповідно до прийнятих початкових умов (3.14) розглядаємо усталений стан (3.13) руху автоматичного транспортувального засоба-шатла, тому:

$$f(t) - a_0 v_w(t_0) = 0. \quad (4.41)$$

Завдяки останньому співвідношенню (3.5) рівність (4.41) набуде вигляду:

$$U_e(t) - \frac{R_e}{2B_e} mg\delta - a_0 v_w(t_0) = 0. \quad (4.42)$$

Із рівності (4.42) можемо отримати відповідну електричну напругу рушійних електричних двигунів автоматичного транспортувального засоба-шатла:

$$U_e(t) = \frac{R_e}{2B_e} mg\delta + a_0 v_w(t_0). \quad (4.43)$$

Результат (4.43) цілком узгоджений із раніше отриманим співвідношенням (3.15). Вибір електричної напруги живлення досить важко підібрати у вигляді (4.43), відповідній умові (4.41), через невизначеність коефіцієнту тертя кочення та маси вантажу, але для дослідження перехідних процесів при зміні налаштувань ПД-регулятора швидкості використання умови виправдане завдяки лінійності об'єкту автоматизації. Диференціальне рівняння для подальшої побудови математичної моделі перехідних процесів, відповідних зміні налаштувань ПД-регулятора швидкості автоматичного транспортувального засоба-шатла, з урахуванням (4.40) та (4.41) матимемо у вигляді:

$$a_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = -a_2 \frac{d^2 u}{dt^2} - a_1 \frac{du}{dt} - a_0 u. \quad (4.44)$$

Зрозуміло, що диференціальні рівняння, які будуть отримані у подальшому за допомогою співвідношення (4.44), має сенс розглядати насправді лише із початковими умовами (3.14) з урахуванням прийнятих припущень.

Диференціальне рівняння (4.44) узагальнено представляє властивості автоматичного транспортувального засоба-шатла, та в ньому не враховано вплив ПД-регулятора швидкості. Вплив ПД-регулятора швидкості на автоматичний транспортувальний засіб-шатл (4.44) врахуємо таким самим шляхом, що був використаний раніше при отриманні співвідношення (3.36), та отримаємо таке:

$$a_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = -a_2 \frac{d^2 u}{dt^2} - a_1 \frac{du}{dt} - a_0 u - k_p x - k_I \int x(t) dt - k_D \frac{dx}{dt}. \quad (4.45)$$

Для перетворення співвідношення (4.45) використовуємо заміну змінної (3.37) та в результаті матимемо таке диференціальне рівняння:

$$a_2 \frac{d^3 \tilde{x}}{dt^3} + (a_1 + k_D) \frac{d^2 \tilde{x}}{dt^2} + (a_0 + k_P) \frac{d\tilde{x}}{dt} + k_I \tilde{x} = -a_2 \frac{d^2 u}{dt^2} - a_1 \frac{du}{dt} - a_0 u. \quad (4.46)$$

Диференціальне рівняння (4.46) розглядаємо із початковими умовами (3.39). У вигляді (4.46), (3.39) маємо математичну модель перехідних процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі при зміні налаштувань ПД-регулятора швидкості. Бачимо, що такі процеси є досить складним, оскільки визначаються диференціальним рівнянням третього порядку та залежать не тільки від самого керування, але також від його швидкості та прискорення. Такий складний характер формування перехідних процесів не дозволяє одразу ж передбачувати притаманні їм властивості, тому, дослідження перехідних процесів є важливим, щоб уникнути

непередбачуваних наслідків впливу таких процесів на автоматичний транспортувальний засіб-шатл.

Диференціальне рівняння (4.46) математичної моделі перехідних процесів, які відбуваються в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі при зміні налаштування ПД-регулятора швидкості відповідно керуванню (4.39), є лінійним.

Завдяки цьому з урахуванням початкових умов (3.39) можемо з використанням перетворення Лапласа (3.19) представити такі перехідні процеси, що визначаються диференціальним рівнянням (4.46) у вигляді динамічної ланки (див. рис. 3.1), передавальна функція якої відповідно диференціальному рівнянню (4.46) із початковими умовами (3.39) з урахуванням заміни змінної (3.37) матиме вигляд:

$$W(s) = -\frac{a_2 s^3 + a_1 s^2 + a_0 s}{a_2 s^3 + (a_1 + k_D) s^2 + (a_0 + k_P) s + k_I}. \quad (4.47)$$

Передаточна функція (4.47) містить в собі вичерпну інформацію про перехідні процеси, що відбуваються в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі при зміні налаштування ПД-регулятора швидкості відповідно (4.39). Вираз (4.47) свідчить про складний характер формування перехідних процесів, що відбуваються при зміні налаштування ПД-регулятора швидкості відповідно керуванню (4.39) через залежність від багатьох факторів, які визначають як конструкцію транспортувального засобу-шатла, так і параметри його ПД-регулятора. Це не дозволяє одразу ж передбачити характер таких перехідних процесів та потребує їхнього дослідження.

4.3.2 Дослідження перехідних процесів при зміні налаштувань ПД-регулятора в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі

Завдання внутрішньо-складських логістичних систем, які обробляють лише штучні вантажі, змінюється дискретно в моменти завершення виконання транспортувальних операцій, тому для таких систем характерним є зміна налаштувань ПД-регулятора швидкості автоматичного транспортувального засоба-шатла лише в окремі моменти часу. За цих умов особливої уваги потребує перехідна функція, відповідна диференціальному рівнянню (4.46), що визначає досліджувані процеси в автоматичного транспортувального засоба-шатла при миттєвій стрибковій зміні налаштувань ПД-регулятора швидкості. Для визначення перехідної функції автоматичного транспортувального засоба-шатла з урахуванням зміни налаштування ПД-регулятора швидкості відповідно математичній моделі (4.46), (3.39), розглянемо керування (4.39) у вигляді:

$$u(t) = \eta(t), \quad \eta(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 1, & t \geq 0. \end{cases} \quad (4.48)$$

де $\eta(t)$ – відома ступінчаста функція Хевісайда.

Процес, що відбувається в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі, у випадку керування (4.48) визначає перехідну функцію:

$$u(t) = \eta(t) \Rightarrow x(t) = h(t), \quad (4.49)$$

де $h(t)$ – перехідна функція автоматичного транспортувального засоба-шатла.

Для дослідження перехідної функції (4.49) процесу зміни налаштувань ПД-регулятора швидкості автоматичного транспортувального засоба-шатла відповідно керуванню (4.48) використовуватимемо перетворення Лапласа (3.19), яке надає можливість визначати зображення перехідної функції:

$$H(s) = \int_0^{\infty} h(t) e^{-st} dt. \quad (4.50)$$

При цьому враховуємо, що перетворення Лапласа (3.19) керування (4.48):

$$U(s) = \int_0^{\infty} \eta(t) e^{-st} dt \Rightarrow U(s) = \frac{1}{s}. \quad (4.51)$$

З урахуванням визначення (4.49), позначення (4.50), результату (4.51) та вигляду (4.47) передавальної функції завдяки співвідношенню (3.21) маємо:

$$H(s) = -\frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{a_2 s^3 + (a_1 + k_D) s^2 + (a_0 + k_P) s + k_I}. \quad (4.52)$$

Завдяки виразу (4.52) визначимо перехідну функцію (4.49) шляхом зворотного перетворення Лапласа, для чого розглянемо корені рівняння:

$$a_2 \lambda^3 + (a_1 + k_D) \lambda^2 + (a_0 + k_P) \lambda + k_I = 0, \quad (4.53)$$

де λ – узагальнене позначення коренів відповідного рівняння.

Зрозуміло, що для рівняння (4.53) маємо три кореня:

$$a_2 s^3 + (a_1 + k_D) s^2 + (a_0 + k_P) s + k_I = (s - \lambda_1)(s - \lambda_2)(s - \lambda_3), \quad (4.54)$$

де λ_1 , λ_2 та λ_3 – корені рівняння (4.53).

Завдяки кореням (4.53) з урахуванням і (4.54) вираз (4.52) буде таким:

$$H(s) = -\frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{(s - \lambda_1)(s - \lambda_2)(s - \lambda_3)}. \quad (4.55)$$

Представимо вираз (4.55) у такому вигляді:

$$H(s) = \frac{A}{s - \lambda_1} + \frac{B}{s - \lambda_2} + \frac{C}{s - \lambda_3}, \quad (4.56)$$

де A , B та C – сталі, які забезпечують відповідність виразу (4.55).

Для визначення сталих A , B та C перетворимо вираз (4.56):

$$H(s) = \frac{A(s - \lambda_2)(s - \lambda_3) + B(s - \lambda_1)(s - \lambda_3) + C(s - \lambda_1)(s - \lambda_2)}{(s - \lambda_1)(s - \lambda_2)(s - \lambda_3)}. \quad (4.57)$$

Упорядкуємо подібні доданки у чисельнику виразу (4.57):

$$H(s) = \frac{(A + B + C)s^2 - (A(\lambda_2 + \lambda_3) + B(\lambda_1 + \lambda_3) + C(\lambda_1 + \lambda_2))s + A\lambda_2\lambda_3 + B\lambda_1\lambda_3 + C\lambda_1\lambda_2}{(s - \lambda_1)(s - \lambda_2)(s - \lambda_3)}. \quad (4.58)$$

Порівняння виразу (4.58) із виразом (4.55) дозволить записати рівність:

$$(A + B + C)s^2 - (A(\lambda_2 + \lambda_3) + B(\lambda_1 + \lambda_3) + C(\lambda_1 + \lambda_2))s + A\lambda_2\lambda_3 + B\lambda_1\lambda_3 + C\lambda_1\lambda_2 = -a_2 s^2 - a_1 s - a_0. \quad (4.59)$$

Як свідчить рівність (4.59), сталі A , B та C , завдяки виразу (4.56) вигляд перехідної функції істотно залежить від вигляду коренів рівняння (4.53):

$$\lambda_k = \alpha_k + i\beta_k, \quad k = 1, 2, 3, \quad (4.60)$$

де α_k та β_k дійсна та уявна частина кореня λ_k рівняння (4.53).

Параметри ПД-регулятора мають бути такими:

$$\alpha_k < 0, \quad k = 1, 2, 3. \quad (4.61)$$

Щоб дослідити характерні властивості перехідних процесів після миттєвої зміни налаштування ПД-регулятора швидкості автоматичного транспортувального засоба-шатла розглянемо перехідну функцію (4.55) у випадку дійсних від'ємних коренів (4.60):

$$\lambda_k = -\alpha_k, \quad k = 1, 2, 3, \quad (4.62)$$

де $\alpha_k > 0$ абсолютні значення коренів.

У випадку коренів (4.62) умова (4.59) приведе до трьох умов такого вигляду:

$$\begin{aligned} A + B + C &= -a_2, \\ A(\alpha_2 + \alpha_3) + B(\alpha_1 + \alpha_3) + C(\alpha_1 + \alpha_2) &= a_1, \\ A\alpha_2\alpha_3 + B\alpha_1\alpha_3 + C\alpha_1\alpha_2 &= -a_0. \end{aligned} \quad (4.63)$$

У вигляді (4.63) маємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь, що дозволить визначити сталі A , B та C , які в результаті будуть дійсними числами. Завдяки цьому, з урахуванням прийнятих у вигляді (4.62) коренів рівняння (4.53) вираз (4.56) зображення перехідної функції набуде такого вигляду:

$$H(s) = \frac{A}{s - (-\alpha_1)} + \frac{B}{s - (-\alpha_2)} + \frac{C}{s - (-\alpha_3)}. \quad (4.64)$$

Врахуємо далі відому властивість перетворення Лапласу:

$$\int_0^{\infty} e^{\lambda t} e^{-st} dt = \frac{1}{s - \lambda}. \quad (4.65)$$

Завдяки (4.65) маємо відповідну зображенню (4.64) перехідну функцію:

$$h(t) = Ae^{-\alpha_1 t} + Be^{-\alpha_2 t} + Ce^{-\alpha_3 t}. \quad (4.66)$$

Завдяки результату (4.66) бачимо, що час перехідного процесу при зміні налаштування ПД-регулятора швидкості буде визначатися найменшим по величині коренем (4.62), а узагальнення цього приведе до висновку, що час перехідного процесу визначається коренем (4.60) рівняння (4.53) із меншою за величиною дійсною частиною.

4.4. Висновки за 4 розділом

Можливості традиційних технологій автоматизації, що базується на використанні регуляторів, є досить обмеженими та дозволяють лише керувати окремими параметрами стану автоматичних транспортувальних засобів-шатлів, тому для забезпечення ефективної роботи складської логістичної системи досить привабливим є використання інтелектуалізованих систем, базується на них на оптимізації виробничих процесів з використанням комп'ютерних технологій.

Перевагою інтелектуалізованих систем є можливість врахування великої кількості факторів впливу на формування команд керування автономними транспортувальними засобами-шатлами, яка забезпечується сучасними комп'ютерними технологіями на основі складних математичних моделей.

Складності впровадження інтелектуалізованих систем керування складськими логістичними системами обумовлені необхідністю розгляду таких систем виключно у цілому для належного врахування взаємодії присутніх в них окремих компонент різного призначення, насамперед рухомих автоматичних транспортувальних засіб-шатлів.

Швидкість руху автоматичних транспортувальних засобів-шатлів визначається бажаною пропускнуою спроможністю складської логістичної системи, але через вплив швидкості на витрати електроенергії маємо можливості щодо оптимізації логістичних процесів.

Для економії електричної енергії при виконанні транспортування вантажів слід зменшувати швидкість навантаженого автоматичного транспортувального засоба-шатла, що має більший аеродинамічний опір, та відповідним чином підвищувати швидкість руху порожнього автоматичного транспортувального засоба-шатла для забезпечення заданого системою часу виконання операції транспортування.

При використанні інтелектуалізованих систем керування складськими логістичними системами досить перспективним є забезпечення впливу на автоматичні транспортувальні засоби-шатли через зміну налаштування їхніх ПД-регуляторів швидкості.

Перехідні процеси при зміні налаштування ПД-регуляторів швидкості можуть містити певну небезпеку пошкодження конструкцій та деталей автоматичного транспортувального засоба-шатла, а також транспортованого вантажу.

У вигляді лінійного диференціального рівняння із початковими умовами отримано математичну модель процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі при зміні налаштування ПІД-регулятора швидкості, та представлено таку модель в еквівалентній формі динамічної ланки із відповідною передавальною функцією. Показано, що перехідні процеси при зміні налаштування ПІД-регулятора швидкості істотно залежать від конструкції автоматичного транспортувального засоба-шатла та параметрів його ПІД-регулятора швидкості.

Перелік використаних джерел у даному розділі наведено у повному списку використаних джерел під номерами: [8, 21, 53, 56-58, 60, 90, 105-114].

Матеріали цього розділу опубліковано в роботах автора [2, 3, 5, 8, 9, 11, 14, 17], що наведено в додатку И.

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ТРАНСПОРТУВАЛЬНОМУ ЗАСОБІ-ШАТЛІ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА НАТУРНИХ ВИПРОБУВАНЬ

5.1 Комп'ютерне моделювання електромеханічних процесів в транспортувальному засобі-шатлі

Автоматичний транспортувальний засіб-шатл є складною електромеханічною системою [21], але запропонована у розд. 2 математична модель у вигляді нелінійної системи двох звичайних диференціальних рівнянь із початковими умовами дозволяє оцінювати процеси в ньому. Взагалі, не можемо отримати точні аналітичні розв'язки такої нелінійної системи диференціальних рівнянь, тому слід використати відповідні обчислювальні методи, які приводять до наближених, але близьких із точними, розв'язків шляхом обчислювальних експериментів. Перевагою обчислювальних методів [115] є можливість оцінювання характеристик процесів, що неможливо виміряти безпосередньо при проведенні натурних випробувань, або через складності виконання таких випробувань. В той же час, математичні моделі побудовані в межах певної схематизації та бажані натурні експерименти для підтвердження результатів математичного моделювання або самих математичних моделей [116-117].

Запропонована у вигляді нелінійного диференціального рівняння (2.40), (2.37), лінійного диференціального рівняння (2.29) та початкових умов (2.30) математична модель дозволяє для заданої електричної напруги живлення $U_e = U_e(t)$, що подається на рушійні електричні двигуни, визначати стан транспортувального засоба-шатла як електромеханічної системи із деталізацією у відповідності із прийнятою схематизацією (див.

рис. 2.2). Таке визначення передбачає розв'язування відповідної нелінійної у загальному випадку системи двох звичайних диференціальних рівнянь другого порядку із відповідними початковими умовами [24, 56-58], що насправді представляє досить складну математичну задачу, яка у загальному випадку може бути розв'язана лише наближено за допомогою відповідних обчислювальних методів. Використання різноманітних обчислювальних методів щодо розв'язування системи звичайних диференціальних рівнянь із початковими умовами передбачає виконання великих обсягів розрахунків, які зручно здійснювати за допомогою комп'ютерів та відповідного програмного забезпечення, що природно приводить до комп'ютерного моделювання процесів в транспортувальному засобі-шатлі [26, 116-117].

5.1.1 Зведення задачі до системи диференціальних рівнянь першого порядку

Звичайні диференціальні рівняння (2.40) та (2.29) другого порядку завдяки своєму компактному вигляду є досить зручними для представлення математичної моделі процесів в транспортувальному засобі-шатлі [90]. З іншого боку, запис диференціальних рівнянь математичної моделі у вигляді (2.40) та (2.29) не є зручним для наближеного їх розв'язування обчислювальними методами, оскільки переважна більшість таких методів передбачає формулювання задачі у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь першого порядку. Щоб представити диференціальні рівняння (2.40) та (2.29) другого порядку належним чином, введемо нові змінні:

$$x_1 = q_1, \quad x_2 = q_2, \quad x_3 = \dot{q}_1, \quad x_4 = \dot{q}_2, \quad (5.1)$$

де x_1, x_2, x_3 та x_4 – нові змінні, які є узагальненими координатами та швидкостями транспортувального засоба-шатла як електромеханічної системи.

Перетворимо диференціальні рівняння (2.40) та (2.29) до вигляду:

$$\ddot{q}_1 = \frac{1}{J} M(\dot{q}_1, \dot{q}_2), \quad (5.2)$$

$$\ddot{q}_2 = -\frac{B_e}{L_e} \dot{q}_1 - \frac{R_e}{L_e} \dot{q}_2 + \frac{1}{L_e} U_e(t). \quad (5.3)$$

Завдяки введеним новим змінним (5.1) диференціальні рівняння (5.2), (5.3) математичної моделі процесів, що відбуваються в транспортувальному засобі-шатлі запишуться у вигляді системи чотирьох диференціальних рівнянь першого порядку, яка разом із початковими умовами (2.30) набуде вигляду:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_3, \\ \dot{x}_2 = x_4, \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{J} M(x_3, x_4), \\ \dot{x}_4 = -\frac{B_e}{L_e} x_3 - \frac{R_e}{L_e} x_4 + \frac{1}{L_e} U_e(t), \end{cases} \quad (5.4)$$

$$x_1(t_0) = \varphi_0, \quad x_2(t_0) = \omega_0, \quad x_3(t_0) = \kappa_0, \quad x_4(t_0) = I_0. \quad (5.5)$$

В третьому диференціальному рівнянні використовується вираз (2.37) для узагальненої сили, і цей вираз для нових змінних (5.1) набуде вигляду:

$$M(x_3, x_4) = \begin{cases} -Bx_3 + 2B_e x_4 - mg\delta \operatorname{sign}(x_3), & x_3 \neq 0, \\ \frac{1}{2}(|2B_e|x_4 - mg\delta| + 2B_e|x_4| - mg\delta) \operatorname{sign}(x_4), & x_3 = 0. \end{cases} \quad (5.6)$$

Таким чином, у вигляді (5.4)–(5.6) маємо математичну модель процесів, що відбуваються в транспортувальному засобі-шатлі як в електромеханічній системі, причому цей вигляд відповідає стандартній формі запису диференціальних рівнянь, яка передбачається у більшості обчислювальних методів. Два останніх диференціальних рівняння (5.4) можна розглядати разом із третім та четвертим початковими умовами (5.6) окремо від перших двох рівнянь, тобто маємо можливість визначати величин x_3 та x_4 окремо від величин x_1 , x_2 , які потім можемо визначити окремо для попередньо знайдених величин x_3 та x_4 . Відповідно за співвідношеннями (5.1) та з урахуванням визначення (2.13) узагальнених координат та їхніх властивостей (2.14) й (2.15) бачимо, що величини x_3 та x_4 представляють собою відповідно кутову швидкість коліс та силу струму обмотування ротору електричних двигунів, а величини x_1 та x_2 представляють собою відповідно кут повороту коліс та електричний заряд обмотування ротору електричних двигунів транспортувального засобу-шатла. В деяких дослідженнях, достатньо розглядати лише третє та четверте рівняння (5.4) із третім та четвертим початковими умовами (5.5). Тут розглядатимемо задачу (5.4)–(5.6) у повному обсязі як систему чотирьох диференціальних рівнянь першого порядку, та визначатимемо усі невідомі (5.1).

5.1.2 Комп'ютерна модель електромеханічних процесів

Розв'язування задачі (5.4)–(5.6) за допомогою обчислювальних методів практично можна виконати лише за допомогою комп'ютеру, що потребує відповідного програмного забезпечення. Таке програмне забезпечення може

створюватися спеціально для виконання кожного дослідження, але для дослідження, що зведено до стандартних математичних розрахунків, можна використовувати універсальні комп'ютерні системи, що були спеціально створеними для виконання стандартних наукових та інженерних розрахунків та моделювання, за умов, якщо ці універсальні системи та забезпечують виконання потрібних для досліджень математичних розрахунків. Оскільки, розв'язування систем диференціальних рівнянь із початковими умовами за допомогою обчислювальних методів є стандартною математичною задачею, то велика кількість наявних систем для виконання наукових та інженерних розрахунків та моделювання передбачає виконання відповідних розрахунків. За цих умов немає потреби спеціально розробляти програмне забезпечення, а використати існуючі універсальні системи із дотриманням ліцензійних умов. Зрозуміло, що найбільш привабливим є вільне програмного забезпечення із відкритим кодом, але при цьому слід обґрунтовувати достовірність отримуваних результатів, щоб мати впевненість про коректне використання програмного забезпечення. Для комп'ютерного моделювання процесів, що відбуваються в транспортувальному засобі-шатлі, будемо використовувати вільну для користування універсальну комп'ютерну систему Scilab із відкритим кодом, яка розроблена спеціально для виконання наукових та інженерних розрахунків, а також для моделювання процесів.

Комп'ютерне моделювання процесів в транспортувальному засобі-шатлі за допомогою системи Scilab зводиться до визначення та подальшого розв'язування засобами цієї системи сформульованої у вигляді (5.4)–(5.6) математичної задачі про інтегрування системи чотирьох звичайних диференціальних рівнянь першого порядку із відповідним початковими умовами. Комп'ютерна модель процесів, що відбуваються в транспортувальному засобі-шатлі та визначаються математичною моделлю (5.4)–(5.6), показана в дод. А на рис. А.1. В комп'ютерній моделі (рис. А.1) передбачені параметри, що використані в математичній моделі (5.4)–(5.6) та

додатково прийнято, що моменти інерції коліс визначаються як для суцільного диску:

$$J_w = \frac{1}{2} m_w r_w^2, \quad (5.7)$$

де m_w – маса колеса.

При виконанні комп'ютерного моделювання прийнято вихідні данні:

$$m = 110 \text{ кг}, b = 1,5 \frac{\text{кг}}{\text{с}}, m_w = 1,2 \text{ кг}, r_w = 62,5 \text{ мм}, \delta = 2 \text{ мм}, \quad (5.8)$$

$$J_e = 0,02 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, R_e = 2,0 \text{ Ом}, L_e = 25 \text{ мГн}, B_e = 0,55 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}}. \quad (5.9)$$

Вихідні данні (5.2), (5.9) наближено відповідають транспортувальному засобі-шатлі, конструкція якого була розглянута вище у п. 2.1.1, та враховують власну вагу засоба-шатла та вантажу. В комп'ютерній моделі на рис. А.1 передбачено, що початковий момент відповідає нульовому часу, тобто:

$$t_0 = 0. \quad (5.10)$$

При комп'ютерному моделюванні (рис. А.1) рух транспортувального засоба-шатла розглядатимемо протягом певного проміжку часу та результати моделювання будемо представляти із заданим кроком часу:

$$t_{fin} = 20 \text{ с}, \Delta t = 10 \text{ мс}, \quad (5.11)$$

де t_{fin} – значення проміжку часу від початкового моменту (2.50) до завершення комп'ютерного моделювання процесів в транспортувальному засобі-шатлі; Δt – крок часу, з яким при виконанні комп'ютерного моделювання відтворюються процеси, що відбуваються в транспортувальному засобі-шатлі.

В розробленій комп'ютерній моделі (рис. А.1) узагальнена сила механічної частини розглянута у загальному нелінійному вигляді (5.6), але при цьому враховуються специфіка виконання наближених обчислень, в яких ірраціональні дійсні числа представляються з використанням скінченної кількості десятинних розрядів, та замість виразу (5.6) використовується таке:

$$M(x_3, x_4) = \begin{cases} -Bx_3 + 2B_e x_4 - mg\delta \text{sign}(x_3), & |x_3| > 10^{-7}, \\ \frac{1}{2}(|2B_e |x_4| - mg\delta| + 2B_e |x_4| - mg\delta) \text{sign}(x_4), & |x_3| < 10^{-7}. \end{cases} \quad (5.12)$$

Використання програмного забезпечення для комп'ютерного моделювання процесів в транспортувальному засобі-шатлі обов'язково потребує обґрунтування одержуваних у подальшому результатів, щоб підтвердити відсутність помилок у використовуваному програмному забезпеченні, в розроблюваних комп'ютерних моделях, та показати коректне використання програмного забезпечення. Зрозуміло, що таке обґрунтування передбачає як тестування окремих компонент програмного забезпечення так й тестування програмного забезпечення в цілому. Оскільки для виконання комп'ютерного моделювання використовувалося програмне забезпечення сторонніх розробників, а саме – комп'ютерна система Scilab та вбудоване в неї середовище графічного моделювання Xcos, то не будемо тестувати окремі компоненти програмного забезпечення, які були протестованими незалежно його виробниками, та зосередимся на тестуванні розробленої комп'ютерної моделі (рис. А.1) процесів в транспортувальному засобі-шатлі.

Для тестування розробленої комп'ютерної моделі (рис. А.1) розглянемо процеси, що відбуватимуться в транспортувальному засобі-шатлі при його розганянні із нерухомого стану миттєво поданою на електричні двигуни сталою напругою, яким відповідають початкові умови (5.5) та напруга:

$$\varphi_0 = 0, \omega_0 = 0, \kappa_0 = 0, I_0 = 0, \quad (5.13)$$

$$U_e(t) = U_e, \quad (5.14)$$

де $U_e > 0$ – величина сталої електричної напруги, що миттєво подається на рушійні електричні двигуни транспортувального засобу-шатла.

Вибір електричної напруги живлення у вигляді сталого значення (5.14) обумовлений тією обставиною, що в такому випадку матимемо розв'язок диференціальних рівнянь (5.4) із такими властивостями:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_3(t) = x_3^{(\infty)}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} x_4(t) = x_4^{(\infty)}, \quad (5.15)$$

де $x_3^{(\infty)} = const$ та $x_4^{(\infty)} = const$ представляють собою деякі значення.

Для визначення значень (5.15) потрібні два останні диференціальних рівняння (5.4) та лінеаризований вираз узагальненої сили (5.6) для $x_3 > 0$:

$$M(x_3, x_4) = -Bx_3 + 2B_e x_4 - mg\delta. \quad (5.16)$$

Завдяки властивостям (5.15), (5.16) два останні рівняння (5.4) будуть такими:

$$\begin{cases} -Bx_3^{(\infty)} + 2B_e x_4^{(\infty)} = mg\delta, \\ B_e x_3^{(\infty)} + R_e x_4^{(\infty)} = U_e. \end{cases} \quad (5.17)$$

Таким чином, для визначення значень сталих $x_3^{(\infty)}$ та $x_4^{(\infty)}$, що містяться у властивостях (5.15), маємо систему двох лінійних алгебраїчних рівнянь (5.17), розв'язок якої можемо представити за допомогою правила Крамера:

$$x_3^{(\infty)} = \frac{\begin{vmatrix} mg\delta & 2B_e \\ U_e & R_e \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -B & 2B_e \\ B_e & R_e \end{vmatrix}}, \quad x_4^{(\infty)} = \frac{\begin{vmatrix} -B & mg\delta \\ B_e & U_e \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -B & 2B_e \\ B_e & R_e \end{vmatrix}}. \quad (5.18)$$

Обчислення визначників у виразах (5.18) приведуть до такого результату:

$$x_3^{(\infty)} = \frac{2B_e U_e - R_e mg\delta}{R_e B + 2B_e^2}, \quad x_4^{(\infty)} = \frac{B U_e + B_e mg\delta}{R_e B + 2B_e^2}. \quad (5.19)$$

З урахуванням нерівності $x_3 > 0$ матимемо відповідну нерівність $x_3^{(\infty)} > 0$, що завдяки першому виразу (5.19) приведе нас до такої нерівності:

$$2B_e U_e - R_e mg\delta > 0 \Rightarrow U_e > \frac{R_e}{2B_e} mg\delta. \quad (5.20)$$

Нерівність (5.20) визначає значення електричної напруги живлення рушійних електричних двигунів транспортувального засоба-шатла, яке забезпечує подолання сил тертя кочення коліс для зрушення з нерухомого стану. Для вихідних даних (5.8), (5.9) нерівність (5.20) набуде вигляду:

$$U_e > 5,89 \text{ В}. \quad (5.21)$$

Зрушення з нерухомого стану транспортувального засоба-шатла вимагає величини (5.21) напруги живлення рушійних електричних двигунів.

З урахуванням нерівності (5.21) для комп'ютерного моделювання процесів в транспортувальному засобі-шатлі використовуватимемо далі таке значення:

$$U_e = 24 \text{ В.} \quad (5.22)$$

Результати щодо процесів, які відбуваються в транспортувальному засобі-шатлі, які одержані при виконанні розробленої програми-сценарію (дод. А) для тестування комп'ютерної моделі (рис. А.1), показані на рис. 5.1–5.6. Бачимо на рис. 5.1 та рис. 5.2, що протягом часу спостерігається майже лінійний закон збільшення кута повороту коліс та електричного заряду в ланцюзі ротору рушійних електричних двигунів транспортувального засобу-шатла.

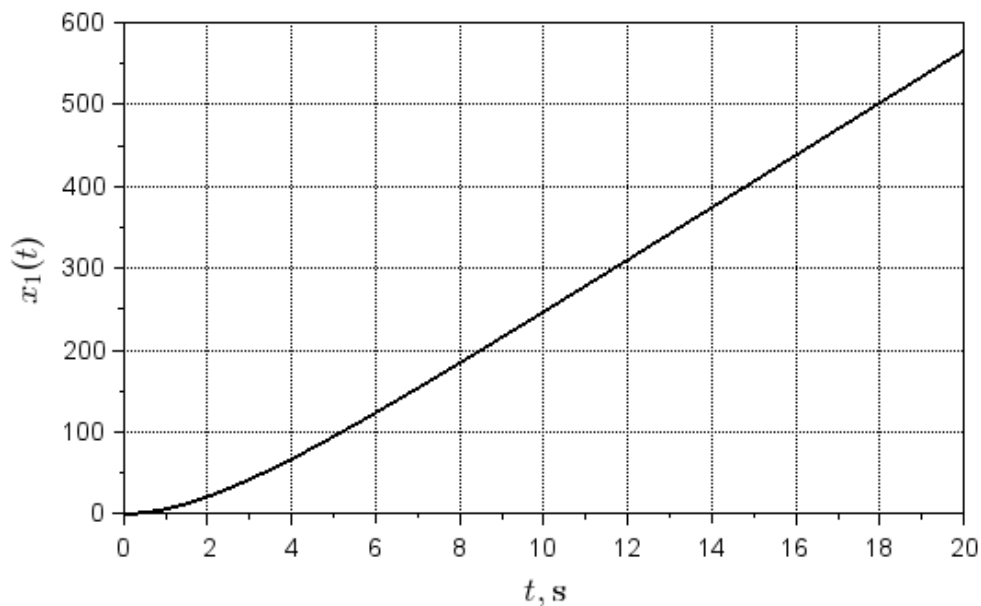


Рисунок 5.1 – Результати визначення кута повороту коліс транспортувального засоба-шатла при тестуванні комп'ютерної моделі

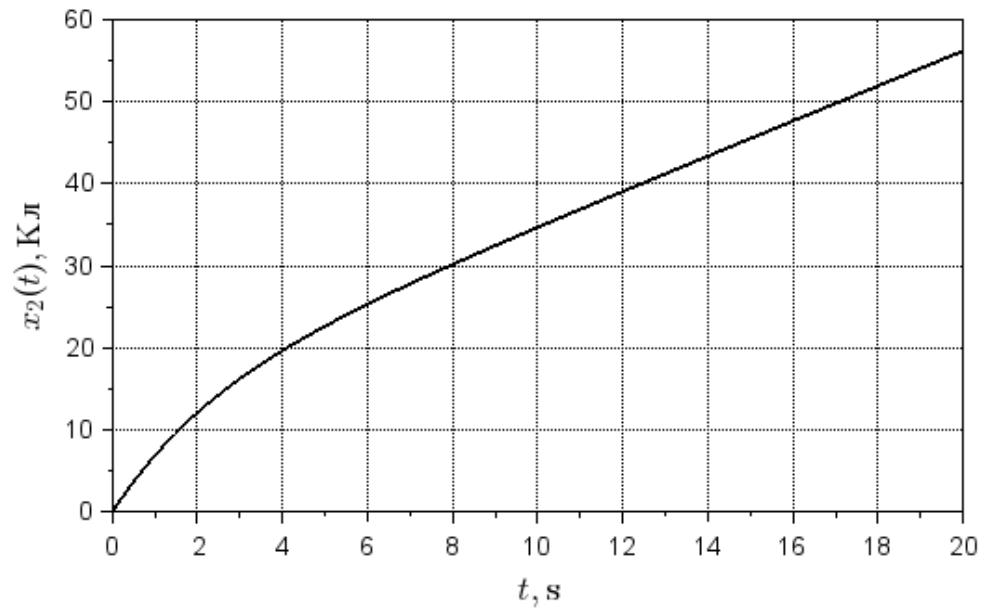


Рисунок 5.2 – Результати визначення електричного заряду в ланцюзі ротору рушійного електричного двигуна транспортувального засоба-шатла при тестуванні комп'ютерної моделі

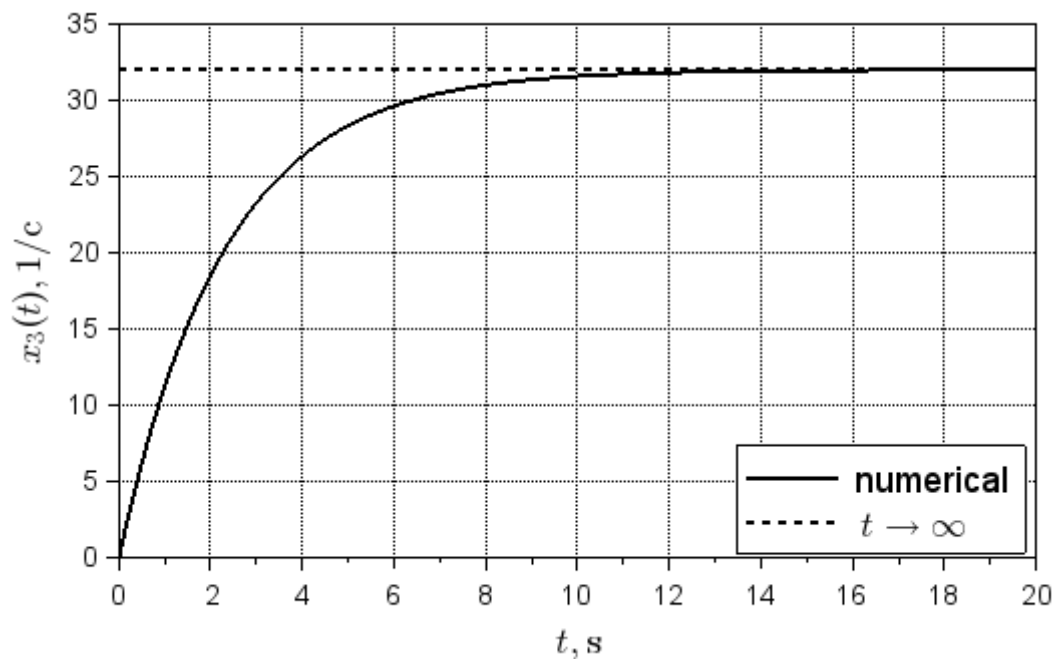


Рисунок 5.3 – Результати визначення кутової швидкості коліс транспортувального засоба-шатла при тестуванні комп'ютерної моделі

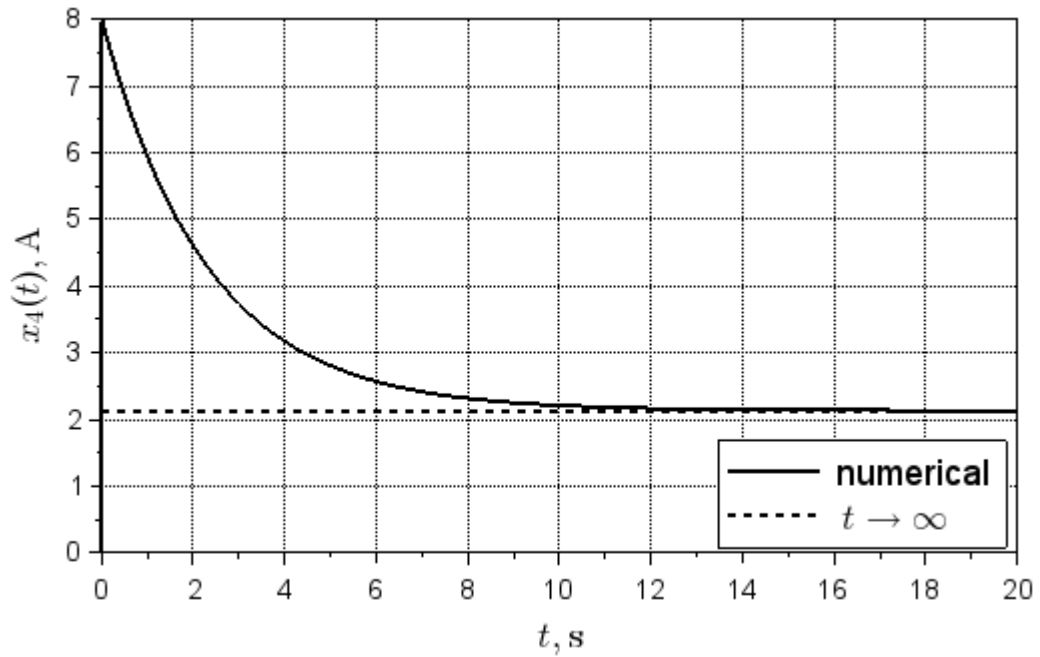


Рисунок 5.4 – Результати визначення електричного струму в ланцюзі ротору рушійного електричного двигуна транспортувального засоба-шатла при тестуванні комп'ютерної моделі

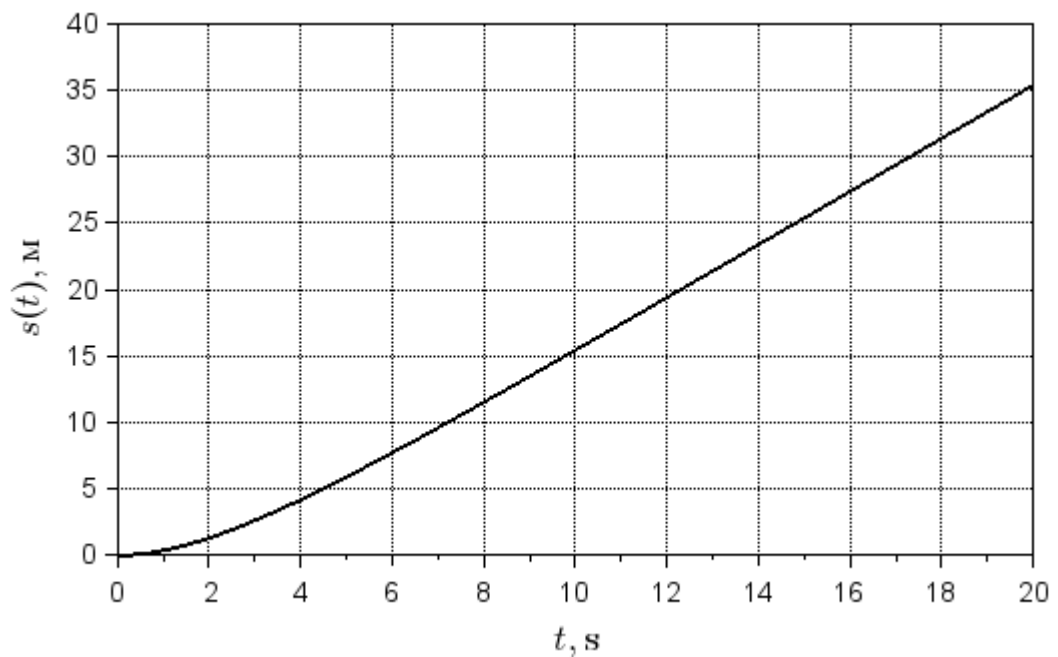


Рисунок 5.5 – Результати визначення прямолінійної координати корпусу транспортувального засоба-шатла при тестуванні комп'ютерної моделі

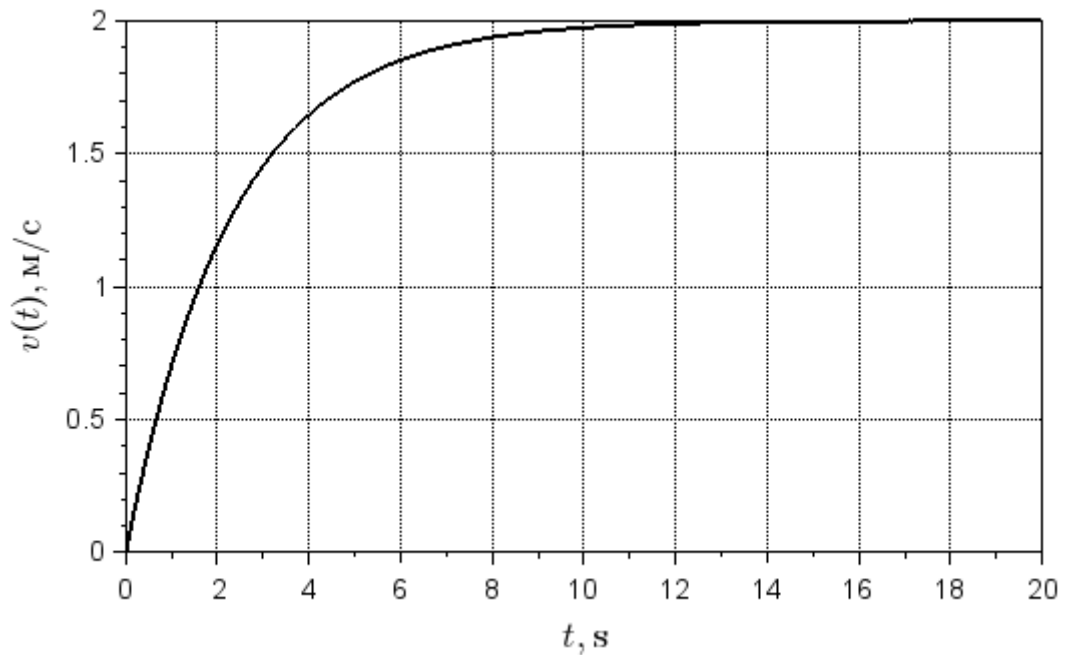


Рисунок 5.6 – Результати визначення швидкості прямолінійного руху корпусу транспортувального засоба-шатла при тестуванні комп'ютерної моделі

Майже лінійний закон є цілком узгодженим із властивостями (5.15), отже результати розрахунків (рис. 5.1 та рис. 5.2) слід вважати правильним на якісному рівні. Для більш надійного тестування розглянемо результати, що одержані для кутової швидкості коліс (рис. 5.3) та силу струму (рис. 5.4) в ланцюгах роторів рушійних електричних двигунів транспортувального засобу-шатла. Бачимо (рис. 5.3 та рис. 5.4), що протягом часу встановлюється майже сталі значення кутової швидкості коліс та сили струму в ланцюгах роторів рушійних електричних двигунів транспортувального засобу-шатла, що повністю узгоджується із властивостями (5.15).

Більш того, маємо повну узгодженість (рис. 5.3 та рис. 5.4) усталених значень кутової швидкості та сили струму відповідно комп'ютерному моделюванню із теоретичними результатами (5.19), що підтверджує коректність та відсутність помилок в розробленій комп'ютерній моделі (рис. А.1). Досить цікавими є наведені на рис. 5.5 та рис. 5.6 одержані з

використанням розробленої моделі данні щодо лінійної координати та швидкості транспортувального засобу-шатла.

Зміна у часі лінійної координати (рис. 5.5) зрозуміло узгоджена із сталою швидкістю, яка встановлюється з часом. Бачимо (рис. 5.6), що швидкість повністю навантаженого транспортувального засоба-шатла обмежена величиною близько 2 м/с, а максимальне прискорення становить близько $0,7 \text{ м/с}^2$.

5.2 Оцінка достовірності результатів шляхом натурних випробувань

5.2.1 Планування експерименту натурних випробувань

Похибки, які вносяться припущеннями, що прийняті при схематизації досліджуваних електромеханічних процесів в транспортувальному засобі-шатлі на етапі побудови їхньої математичної моделі, неможливо оцінити суто теоретично і для цього потрібно порівняти результати моделювання із результатами вимірювань, що виконанні при проведенні натурних випробувань.

Проведення натурних випробувань для оцінки достовірності математичних моделей може бути досить складною задачею через необхідність відтворення досліджуваних процесів та організації потрібних вимірювань.

Відтворення процесів, що відбуваються в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі є досить складною задачею, оскільки досліджувані процеси – це рухи транспортувального засоба-шатла, які можуть здійснюватися на досить великих переміщеннях. Більш того, в конструкції автоматичних транспортувальних засобів-шатлів зазвичай не передбачають спеціальних заходів щодо встановлення наукової

вимірювальної апаратури для проведення детальних вимірювань процесів, що ускладнює проведення таких вимірювань через необхідність внесення змін до конструкції. З урахуванням означених обставин, пропонується використовувати підхід, в якому для проведення натурних випробувань не використовується безпосередньо автоматичні транспортувальні засоби-шатли, що здійснюють рухи із великими переміщеннями, а пропонується використовувати спеціально створювані випробувальні стенди, які певним чином відтворюють процеси, характерні для автоматичного транспортувального засоба-шатла та дозволяють перевіряти коректність гіпотез, що були прийняті при схематизації процесів.

Припущення, що були прийняті при схематизації для побудови математичної моделі процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі привели в результаті до лінеаризованої математичної моделі у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь (2.48). Отже, перевірка достовірності математичної моделі процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі зводиться до перевірки диференціальних рівнянь (2.48). Щоб уникнути досить складних натурних випробувань безпосередньо автоматичного транспортувального засоба-шатла, які вимагатимуть відтворення прямолінійних рухів на досить великих відстанях, розглянемо обґрунтування не самих диференціальних рівнянь (2.48), а їхнього окремого випадку, який відповідає процесам в еквівалентній електромеханічній системі у вигляді окремого двигуна постійного струму, який через редуктор зрушує еквівалентний інерційний елемент, та є математичним еквівалентом транспортувального засобу-шатлу:

$$J \frac{d\omega}{dt} = -b\omega + NB_e I - M_f, \quad L_e \frac{dI}{dt} = -B_e N \omega - R_e I + U_e, \quad (5.23)$$

де ω , J – кутова швидкість обертання вихідного валу редуктора та момент інерції еквівалентної електромеханічної системи; b – параметр лінійного в'язкого опору еквівалентної електромеханічної системи; M_f – момент сухого тертя обертанню ротора електричного двигуна; B_e – електромеханічна характеристика електричного двигуна; N – передаточне число редуктора; I – струм обмотування ротору електричного двигуна; R_e та L_e – активний та індуктивний опір обмотування ротору електричного двигуна; $U_e = const$ – стала напруга живлення електричного двигуна.

Порівняння диференціальних рівнянь (2.48) та (5.23) свідчить про те, що запропонована еквівалентна електромеханічна система із двигуном постійного струму повністю відтворює властивості автоматичного транспортувального засобу-шатлу. Отже, замість виконання ускладнених натурних випробувань автоматичного транспортувального засобу-шатлу, який є досить складним виробом та здійснює рівномірні прямолінійні руху на досить великі відстані, для перевірки коректності математичної моделі автоматичного транспортувального засобу-шатлу можемо обмежитись лише натурними випробуваннями еквівалентної електромеханічної системи із електричним двигуном постійного струму, редуктором та інерційним елементом, процеси в якій визначаються диференціальними рівняннями (2.48) математично тотожними рівнянням (5.23).

При проведенні натурних випробувань щодо перевірки достовірності диференціальних рівнянь (5.23) використовуємо властивість цих рівнянь:

$$t \rightarrow \infty \Rightarrow \frac{d\omega}{dt} \rightarrow 0, \frac{dI}{dt} \rightarrow 0 \Rightarrow \omega(t) \rightarrow \omega = const, I(t) \rightarrow I = const, \quad (5.24)$$

де $\omega = const$ та $I = const$ – усталені значення кутової швидкості вихідного валу редуктора та сили струму обмотування ротору електричного двигуна.

З урахуванням (5.24) рівняння (5.23) спростяться та набудуть вигляду:

$$NB_e I - b\omega = M_f, \quad R_e I + B_e N\omega = U_e. \quad (5.25)$$

Співвідношення (5.25) містять величини, які можна надійно вимірювати за допомогою відповідних приладів, і це величини ω – усталена кутова швидкість обертання вихідного валу редуктора, I – усталений струм обмотування ротору електричного двигуна та U_e – стала напруга живлення електричного двигуна. Отже, випробування можемо здійснювати шляхом подачі на електричний двигун різної за величиною електричної напруги U_e та вимірювання відповідних їй величини ω усталеної кутової швидкості обертання вихідного валу редуктора та величини I усталеного струму обмотування ротору. При поступовому збільшенні величини U_e напруги електричного двигуна від нульового значення при невеликій напрузі маємо нульову кутову швидкість:

$$0 \leq U_e \leq U_{ef} \Rightarrow \omega = 0, \quad (5.26)$$

де U_{ef} – величина живильної електричної напруги, яка призводить до зрушення ротору електричного двигуна.

З урахуванням властивості (5.26) та співвідношень (5.25) матимемо:

$$0 \leq U_e \leq U_{ef} \Rightarrow \omega = 0, \quad I = \frac{U_e}{R_e}. \quad (5.27)$$

Як свідчить отриманий вираз (5.27), процеси в електричному двигуні нерухомої еквівалентної систем відповідають закону Ома, що підтверджує достовірність співвідношень (5.25) та диференціальних рівнянь (5.23). Таким

чином, експериментальна перевірка зводиться до вимірювань електричного струму при різних значеннях усталеної електричної напруги живлення:

$$U_e = U_1 < U_2 < \dots < U_n \leq U_{ef}, \quad I = I_1 < I_2 < \dots < I_n, \quad (5.28)$$

де n – кількість замірів; U_k та I_k встановлювана величина електричної напруги живлення та відповідна їй вимірювана величина електричного струму при проведенні випробування з номерами $k = 1, 2, \dots, n$.

Результати вимірювань (5.28) та властивість (5.27) дозволяють визначити активний опір R_e обмотування ротору електричного двигуна. Для цього розв'язуємо задачу ідентифікацій для результатів вимірювань (5.28) за допомогою методу найменших квадратів, який з урахуванням властивості (5.27) представимо у вигляді:

$$S = \sum_{k=1}^n (I_k R_e - U_k)^2, \quad \frac{dS}{dR_e} = 0. \quad (5.29)$$

Метод найменших квадратів (5.29) приведе до наступного результату:

$$R_e = \frac{\sum_{k=1}^n I_k U_k}{\sum_{k=1}^n I_k^2}. \quad (5.30)$$

При проведенні таких випробувань також можемо визначити величину U_{ef} живильної електричної напруги, яка призводить до зрушення з місця.

Коли величина U_e напруги перевищує величину U_{ef} , вихідний вал редуктора починає обертатися і протягом часу кутова швидкість набуває усталеного значення. Завдяки першому співвідношенню (5.25) маємо:

$$\omega = \frac{NB_e I - M_f}{b}. \quad (5.31)$$

Далі підставимо вираз (5.31) до другого співвідношення (5.25) та отримаємо:

$$R_e I + B_e N \left(\frac{NB_e I - M_f}{b} \right) = U_e \Rightarrow \left(R_e + \frac{B_e^2 N^2}{b} \right) I - \frac{B_e N M_f}{b} = U_e. \quad (5.32)$$

Завдяки результату (5.32) матимемо таке:

$$U_e \geq U_{ef} \Rightarrow I = \frac{B_e N M_f}{R_e b + B_e^2 N^2} + \frac{b}{R_e b + B_e^2 N^2} U_e. \quad (5.33)$$

З урахуванням співвідношень (5.27) та (5.33) маємо в результаті:

$$I = \begin{cases} \frac{U_e}{R_e}, & 0 \leq U_e \leq U_{ef}; \\ \frac{B_e N M_f}{R_e b + B_e^2 N^2} + \frac{b}{R_e b + B_e^2 N^2} U_e, & U_e \geq U_{ef}. \end{cases} \quad (5.34)$$

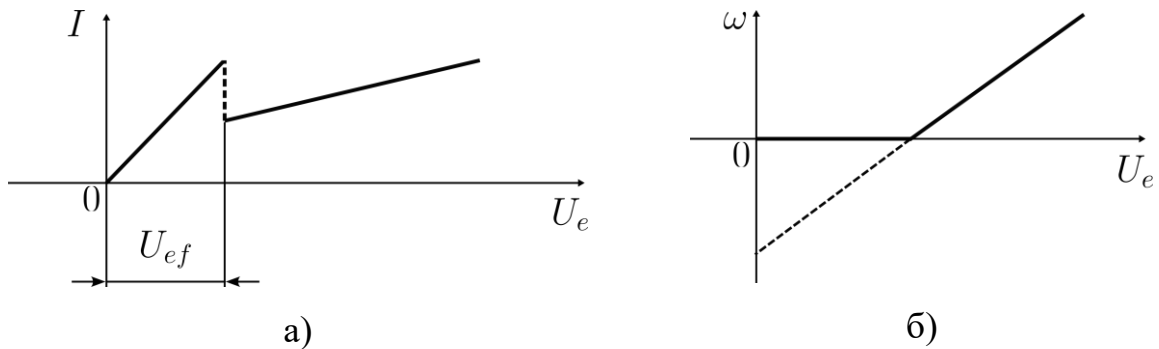
Нелінійна залежність (5.34) між електричним струмом та напругою живлення схематично представлена на рис. 5.7а.

За допомогою першого співвідношення (5.25) можемо визначити:

$$I = \frac{b\omega + M_f}{NB_e}. \quad (5.35)$$

Далі підставимо вираз (5.35) до другого співвідношення (5.25) та отримаємо:

$$R_e \frac{b\omega + M_f}{NB_e} + B_e N \omega = U_e \Rightarrow \left(B_e N + \frac{R_e b}{NB_e} \right) \omega + \frac{R_e M_f}{NB_e} = U_e. \quad (5.36)$$



а) електрична характеристика; б) електромеханічна характеристика

Рисунок 5.7 – Характеристики еквівалентної електромеханічної системи

Завдяки результату (5.36) матимемо таке:

$$U_e \geq U_{ef} \Rightarrow \omega = -\frac{R_e M_f}{R_e b + B_e^2 N^2} + \frac{NB_e}{R_e b + B_e^2 N^2} U_e. \quad (5.37)$$

З урахуванням співвідношення (5.27) та співвідношення (5.37) маємо:

$$\omega = \begin{cases} 0, & 0 \leq U \leq U_{ef}; \\ -\frac{R_e M_f}{R_e b + B_e^2 N^2} + \frac{B_e}{R_e b + B_e^2 N^2} U_e, & U > U_{ef}. \end{cases} \quad (5.38)$$

Нелінійна залежність (5.38) між електричним струмом та напругою живлення схематично представлена на рис. 5.7б.

Експериментальна оцінка параметрів еквівалентної електромеханічної системи зводиться до ідентифікації за результатами вимірювань електричного струму та кутової швидкості при різних значеннях усталеної електричної напруги живлення:

$$U_{ef} \leq U_e = U_1 < U_2 < \dots < U_n, \quad I = I_1 < I_2 < \dots < I_n, \\ \omega = \omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_n, \quad (5.39)$$

де n – кількість замірів; U_k , I_k та ω_k встановлювана величина електричної напруги живлення, відповідна їй вимірювана величина електричного струму та кутової швидкості при проведенні випробування з номерами $k = 1, 2, \dots, n$.

Спочатку використаємо другу властивість (5.25), яку для випадку результатів вимірювання (5.39) представимо у вигляді

$$R_e I_k + B_e N \omega_k - U_k = 0, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (5.40)$$

Результати випробувань (5.39) використовуємо для ідентифікації за допомогою методу найменших квадратів, який з урахуванням (5.40), (5.30) набуде вигляду:

$$S = \sum_{k=1}^n (R_e I_k + B_e N \omega_k - U_k)^2, \quad \frac{\partial S}{\partial B_e} = 0. \quad (5.41)$$

Метод найменших квадратів (5.41) приводить до лінійного рівняння:

$$\left(\sum_{k=1}^n I_k \omega_k \right) R_e + \left(\sum_{k=1}^n \omega_k^2 \right) B_e N = \sum_{k=1}^n U_k \omega_k. \quad (5.42)$$

Розв'язування лінійного алгебраїчних рівняння (5.42) дозволяє отримати розязок задачі ідентифікації:

$$B_e = \left(\sum_{k=1}^n U_k \omega_k - R_e \left(\sum_{k=1}^n I_k \omega_k \right) \right) / \left(N \sum_{k=1}^n \omega_k^2 \right). \quad (5.43)$$

Завдяки (5.43) перша властивість (5.25) для результатів (5.39) буде такою:

$$M_f + b_e \omega_k - NB_e I_k = 0, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (5.44)$$

Для результатів (5.39), (5.44) ідентифікація, за методом найменших квадратів набуде вигляду:

$$S = \sum_{k=1}^n (M_f + b \omega_k - NB_e I_k)^2, \quad \frac{\partial S}{\partial M_f} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial b} = 0. \quad (5.45)$$

Метод найменших квадратів (5.45) приведе до двох лінійних рівнянь:

$$nM_f + \left(\sum_{k=1}^n \omega_k \right) b = NB_e \sum_{k=1}^n I_k, \quad \left(\sum_{k=1}^n \omega_k \right) M_f + \left(\sum_{k=1}^n \omega_k^2 \right) b = NB_e \sum_{k=1}^n I_k \omega_k, \quad (5.46)$$

Розв'язки системи лінійних алгебраїчних рівнянь (5.46) має вигляді:

$$M_f = NB_e \left(\left(\sum_{k=1}^n I_k \right) \left(\sum_{k=1}^n \omega_k^2 \right) - \left(\sum_{k=1}^n I_k \omega_k \right) \left(\sum_{k=1}^n \omega_k \right) \right) / \left(n \left(\sum_{k=1}^n \omega_k^2 \right) - \left(\sum_{k=1}^n \omega_k \right)^2 \right), \quad (5.47)$$

$$b = NB_e \left(n \left(\sum_{k=1}^n I_k \omega_k \right) - \left(\sum_{k=1}^n I_k \right) \left(\sum_{k=1}^n \omega_k \right) \right) / \left(n \left(\sum_{k=1}^n \omega_k^2 \right) - \left(\sum_{k=1}^n \omega_k \right)^2 \right). \quad (5.48)$$

Схема установки щодо проведення випробувань еквівалентної системи показана на рис. 5.8.

Установка містить досліджуваний мотор-редуктор із електричним двигуном постійного струму та кероване джерело постійного струму;

амперметр для вимірювання струму ротору та вольтметр для вимірювання напруги живлення електричного двигуна (рис. 5.8).

Для вимірювання усталеної кутової швидкості вихідного валу редуктора на нього встановлено диск із радіальним вирізами та фотоелектричний пристрій, який при обертанні ротора генерує електричну напругу із стрибками в моменти проходження вирізів.

Ця напруга подається до електронного осцилографу (рис. 5.8), на екрані якого бачимо відповідні імпульси напруги, проміжок часу між якими визначається кутовою швидкістю ротору (рис. 5.9). Т

Така установка (рис. 5.8) дозволяє вимірювати напругу та струм при нерухомому роторі, а також напругу, струм та кутову швидкість. Якщо електрична напруга та струм міряються безпосередньо відповідним вимірювальними приладами, то кутова швидкість міряється непрямо, а через величину проміжку часу між імпульсами, який визначається за допомогою осцилографу (рис. 5.9):

$$\omega = \frac{\alpha}{\tau}, \quad \alpha = \frac{2\pi}{A}, \quad (5.49)$$

де α – кут між серединами радіальних вирізів (рис. 5.8); τ – проміжок часу між імпульсами напруги; A – кількість радіальних вирізів на диску, що використовується для вимірювання кутової швидкості.

Передаточне число мотор-редуктора

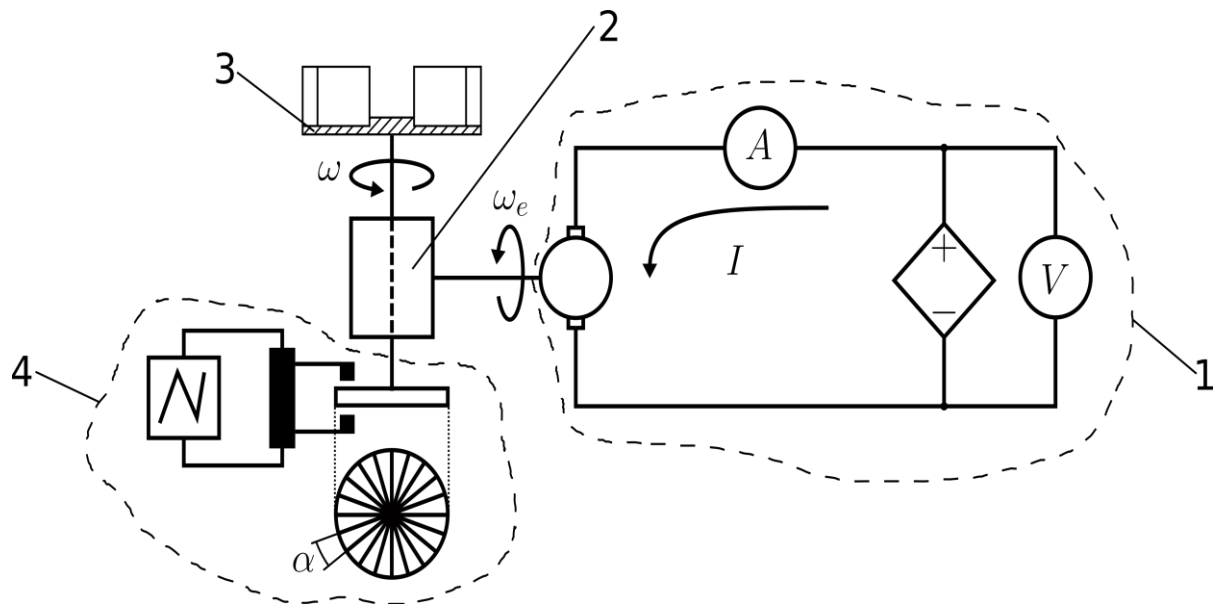
$$N = 48. \quad (5.50)$$

Для вимірювань кутової швидкості ротору використовувались диски із числом радіальних вирізів

$$A = 20. \quad (5.51)$$

Креслення колеса випробувального для моделювання в'язкого опору, що передбачено за схемою проведення випробувань (рис. 5.8), представлено на рис. 5.10; колесо виготовлене в лабораторії 3D друку кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки в Харківському національному університеті радіоелектроніки.

Загальний вигляд створеної для проведення натурних випробувань еквівалентної електромеханічної системи експериментальної установки показано на рис. 5.11.



- 1 – електричний двигун із блоком живлення; 2 – редуктор;
 3 – колесо випробувальне для моделювання в'язкого опору;
 4 – система вимірювання кутової швидкості;

Рисунок 5.8 – Схема проведення випробувань та організації вимірювань щодо оцінки достовірності результатів математичного моделювання

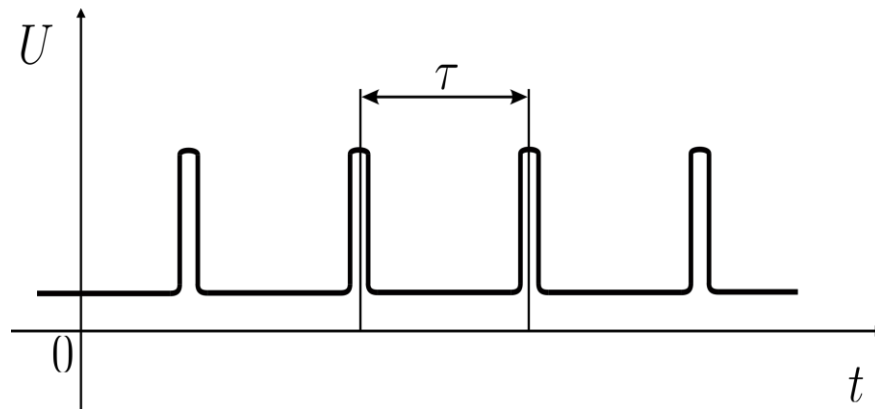


Рисунок 5.9 – Схематичне зображення імпульсів напруги на екрані осцилографа при проведенні випробувань

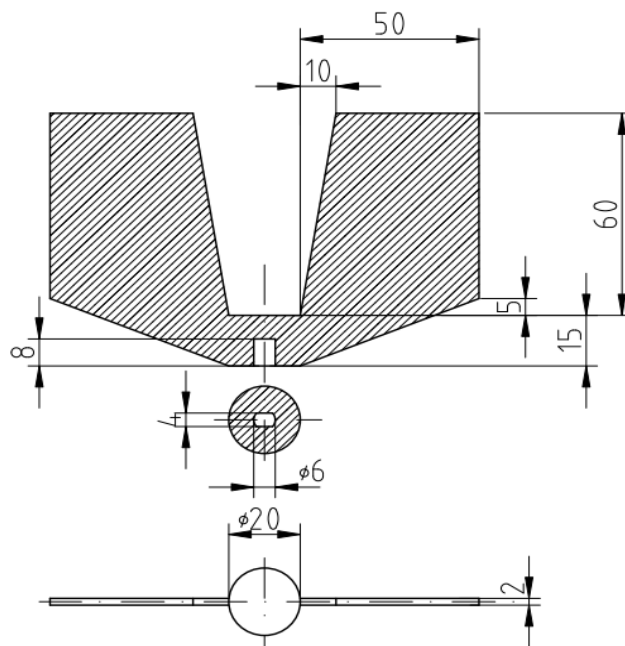


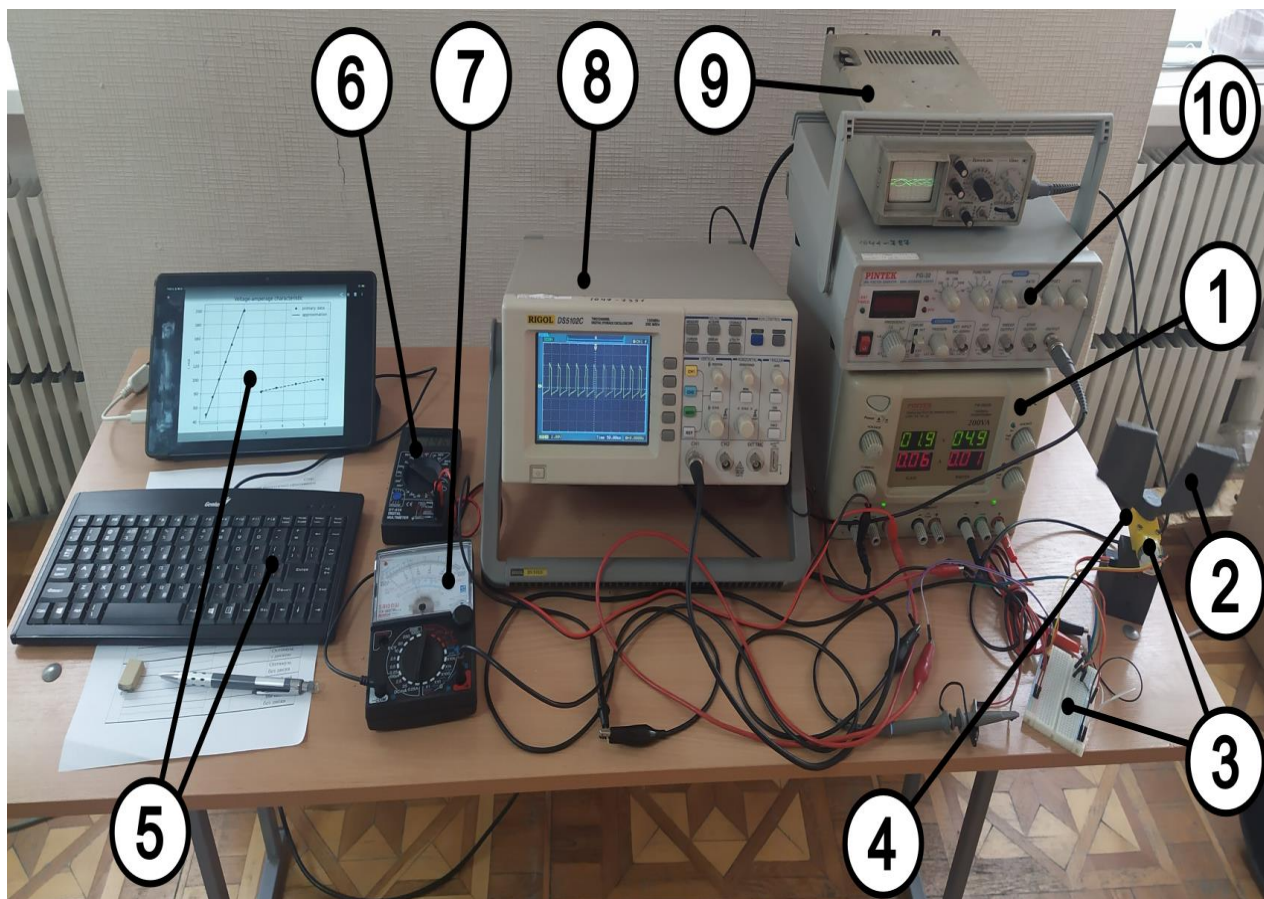
Рисунок 5.10 – Колесо випробувальне для моделювання в'язкого опору

Для проведення випробувань передбачалося устаткування та прилади:

- блок живлення постійного струму PINTEK PW-3033R із плавним регулюванням напруги та вбудованими вольтметром і амперметром;
- колесо випробувальне для моделювання в'язкого опору (рис. 5.10), яке спеціально спроектовано, щоб його можна було легко встановлювати на

вихідному валу редуктора електричного двигуна та знімати з цього вихідного валу;

– мотор-редуктор TT Motor-2 Shafts із електричним двигуном постійного струму, диском із радіальними вирізами для вимірювання кутової швидкості вихідного валу редуктора та макетною платою;



1 – керований блок живлення; 2 – колесо випробувальне для моделювання в'язкого опору; 3 – мотор-редуктор с диском та макетною платою; 4 – оптичний датчик; 5 – планшет з клавіатурою; 6, 7 – цифровий та аналоговий мультиметр; 8, 9 – цифровий та аналоговий осцилограф; 10 – генератор сигналів;

Рисунок 5.11 – Загальний вигляд експериментальної установки із встановленим колесом випробувальним для моделювання в'язкого опору щодо проведення випробувань

- фотоелектричний пристрій – датчик INFRARED-SPEED-SENSOR, який при обертанні валу мотор-редуктора із закріпленням на ньому диском за радіальними вирізами генерує електричну напругу із стрибками в моменти проходження радіальних вирізів у диску;
- планшетний ПК із програмним забезпеченням, розробленим спеціально для обробки результатів вимірювань;
- цифровий мультиметр DT-838 для вимірювання електричної напруги із більшою точністю, ніж вбудований вольтметр джерела живлення;
- аналоговий мультиметр SAIONW YX-360TR_{E-L-V} для вимірювання сили струму із більшою точністю, ніж вбудований вольтметр джерела живлення, та забезпечення фільтрації коливань струму при випробуваннях;
- цифровий осцилограф RIGOL DS5102C для вимірювання проміжку часу між імпульсами електричної напруги в моменти проходження радіальних вирізів у диску при обертанні валу мотор-редуктора
- допоміжний аналоговий осцилограф C1-101 для додаткового візуального контролю електричної напруги на електричному двигуні;
- генератор сигналів PINTEK FG-32 для перевірки точності вимірювання проміжків часу осцилографами.

5.2.2 Дослідження впливу в'язкого опору на рух еквівалентної електромеханічної системи

Виконаємо випробування еквівалентної електромеханічної системи (див. рис. 5.8) без колеса випробувального для моделювання в'язкого опору та з таким колесом.

Здійснюємо випробування для різних значень струму, який вимірюємо аналоговим мультиметром, що має найменшу точність із використовуваних вимірювальних приладів.

Така організація дослідження дозволяє надійно відокремлювати різні умови проведення випробувань та використовувати можливості наявних

вимірювальних приладів, що дозволило отримати результати, які наведені в табл. 5.1 та в табл. 5.2.

Таблиця 5.1 – Результати вимірювань для випадку еквівалентної системи без встановленого колеса випробувального для моделювання в'язкого опору

№	Напруга, В	Струм, мА	Проміжок між імпульсами, мс
1	0,45	50	∞
2	0,72	75	∞
3	0,98	100	∞
4	1,25	125	∞
5	1,5	150	∞
6	1,75	175	∞
7	2,02	200	∞
8	2,95	80	29,20
9	3,65	85	22,29
10	4,56	90	17,11
11	5,85	95	13,00

Одержані результати (табл. 5.1 та табл. 5.2) свідчать про те, що величина U_{ef} живильної електричної напруги, яка призводить до зрушення:

$$2 \text{ В} < U_{ef} < 3 \text{ В}. \quad (5.52)$$

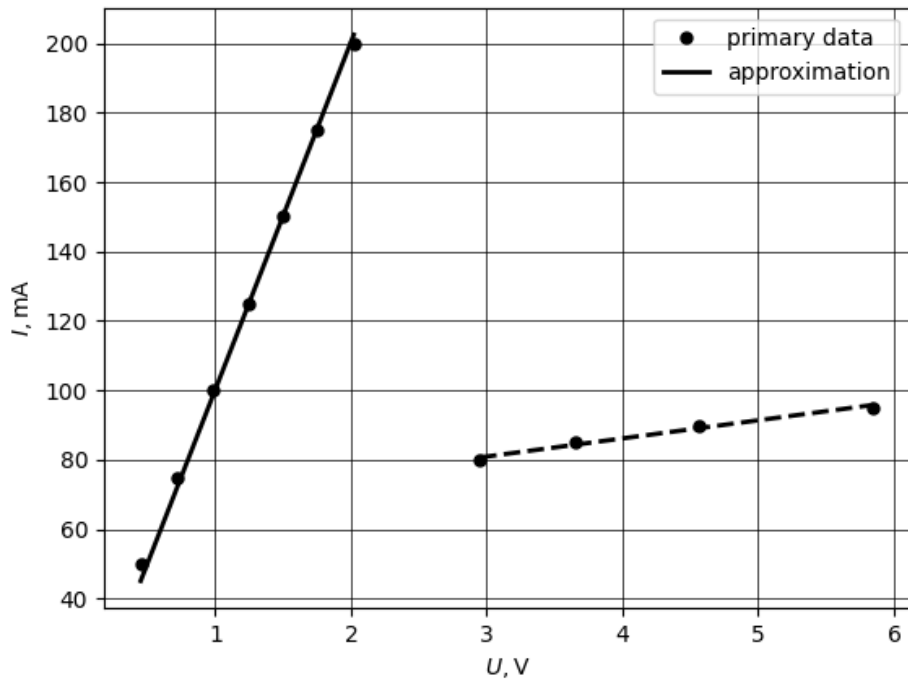
Для обробки результатів на мові програмування Python розроблено програму, текст якої наведено у дод. Б, в якій передбачено введення даних вигляду як в табл. 5.1 або в табл. 5.2, послідовний розрахунок за формулами (5.30), (5.43) та (5.47) й (5.48), а також виведення результатів розрахунків.

Вибір мови програмування обумовлений зручністю використання планшету в умовах лабораторії.

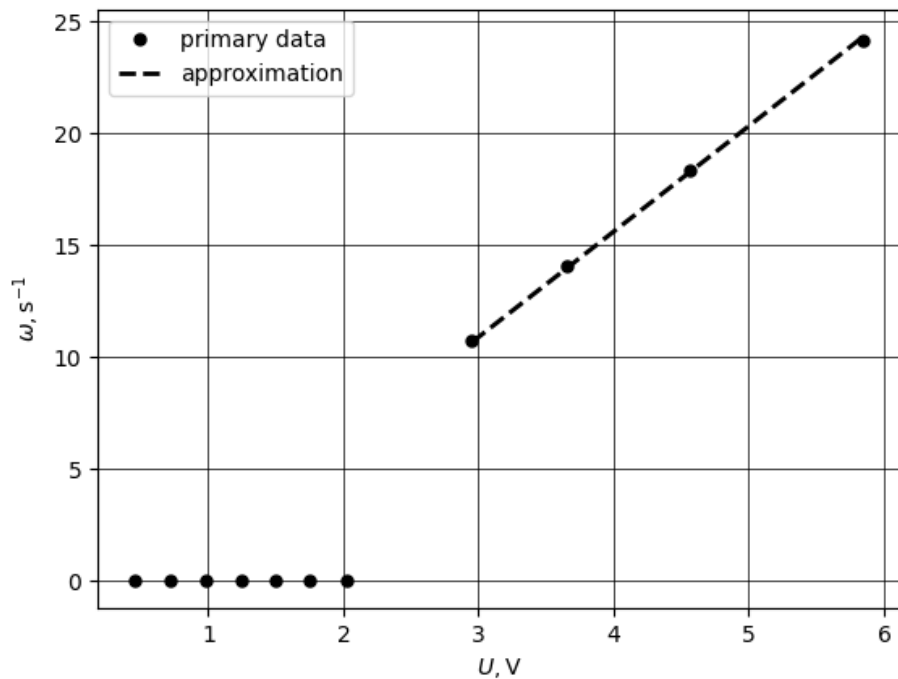
Завдяки цій програмі маємо результати обробки вимірювань у вигляді графіків (рис. 5.12 та рис. 5.13) та в числовій формі (табл. 5.3).

Таблиця 5.2 – Результати вимірювань для випадку еквівалентної системи з встановленим колесом для моделювання в'язкого опору

№	Напруга, В	Струм, мА	Проміжок між імпульсами, мс
1	0,44	50	∞
2	0,71	75	∞
3	0,97	100	∞
4	1,24	125	∞
5	1,48	150	∞
6	1,73	175	∞
7	2,00	200	∞
8	2,77	80	32,00
9	3,45	85	24,29
10	4,37	90	18,22
11	5,19	95	14,83

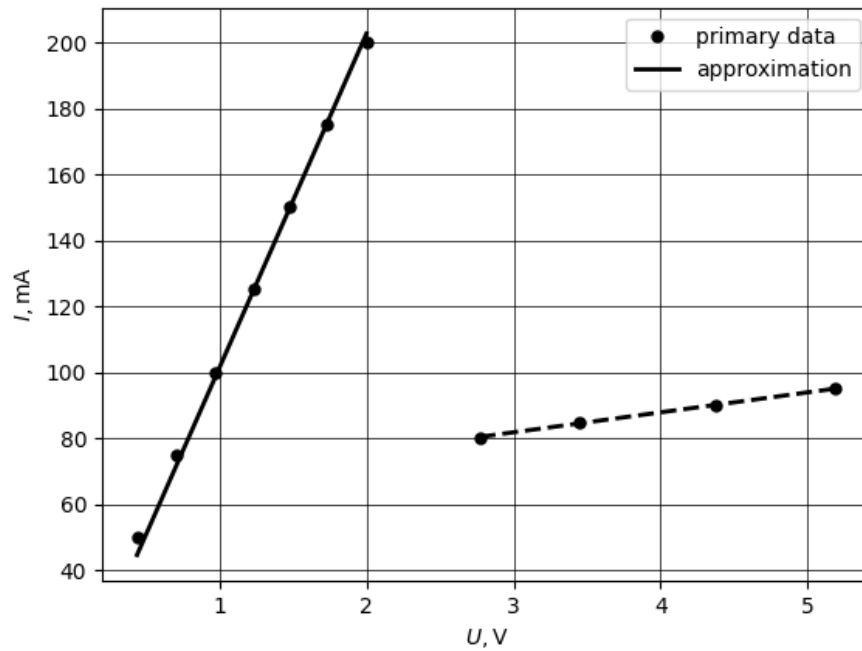


а)

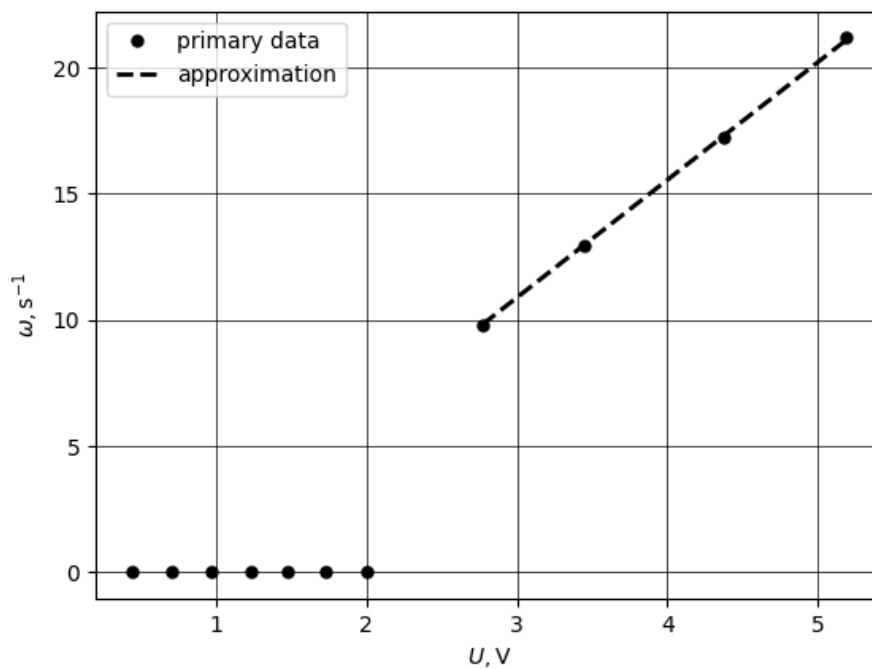


б)

Рисунок 5.12 – Залежність від напруги струму ротора (а) та кутової швидкості вихідного валу мотор-редуктора за результатами вимірювань (маркери) та обробки даних методом найменших квадратів (суцільні лінії) для еквівалентної системи без встановленого колеса випробувального для моделювання в'язкого опору



а)



б)

Рисунок 5.13 – Залежність від напруги струму ротора (а) та кутової швидкості вихідного валу мотор-редуктора за результатами вимірювань (маркери) та обробки даних методом найменших квадратів (суцільні лінії) для еквівалентної системи із встановленим колесом випробувальним для моделювання в'язкого опору

Таблиця 5.3 – Результати обробки вимірювань методом найменших квадратів

Параметри досліджуваної системи	Значення у випадку колеса випробувального для моделювання в'язкого опору		Різниця значень, %
	не встановленого	встановленого	
R_e , Ом	9,978325123152707	9,867980295566502	1,11
B_e , Н·м / А	0,004187489162620	0,004195406799766	0,19
M_f , Н·м	0,013840581305879	0,013627008768593	1,54
b , кг / с	0,000222431356396	0,000261121057878	17,39

Одержані графіки (рис. 5.12 та рис. 5.13) свідчать про повне узгодження із отриманими раніше теоретичним результатами щодо характерного вигляду відповідних залежностей (рис. 5.7), що підтверджує достовірність розробленої математичної моделі транспортувального засобу-шатлу.

Обробка результатів вимірювань (табл. 5.3) наочно свідчить, що колесо випробувальне для моделювання в'язкого опору (рис. 5.10) призводить до помітного збільшення параметра в'язкого опору, а інші параметри при цьому змінюються на порядок менше. Це дозволяє здійснювати розпізнавання досліджуваного об'єкту (можливо також шляхом обробки зображень) – еквівалентної електромеханічної системи, а також керованих об'єктів, протягом експлуатації. Завдяки цій обставині, в якості параметрів досліджуваної еквівалентної електромеханічної системи, окрім параметра в'язкого опору, можна взяти середні значення, що наведені в табл. 5.3:

$$R_e = 9.923152709359606 \text{ Ом}, \quad (5.53)$$

$$B_e = 0.004191447981192944 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}}, \quad (5.54)$$

$$M_f = 0.013733795037235848 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (5.55)$$

Параметр в'язкого опору буде залежить від того, чи встановлене колесо для моделювання в'язкого опору, і значення цього параметра для цих випадків слід обирати відповідно до результатів обробки вимірювань з табл. 5.3.

5.2.3 Дослідження економії електричної енергії за рахунок вибору швидкості руху

Можливості економії електричної енергії за рахунок вибору швидкості руху транспортувального засобу-шатлу у вигляді (4.35) були теоретично показані раніше. Для оцінки економії електричної енергії виконаємо випробування еквівалентної електромеханічної системи (див. рис. 5.8) без колеса для моделювання в'язкого опору та з таким колесом. Представимо вирази (4.35) відповідно до еквівалентної електромеханічної системи (див. рис. 5.8):

$$\omega_L^{(opt)} = \left(1 + \sqrt{\frac{b_E}{b_L}}\right) \frac{\varphi}{t}, \quad \omega_E^{(opt)} = \left(1 + \sqrt{\frac{b_L}{b_E}}\right) \frac{\varphi}{t}, \quad (5.56)$$

де $\omega_L^{(opt)}$ та $\omega_E^{(opt)}$ – оптимальні значення кутової швидкості вихідного валу редуктора еквівалентної електромеханічної системи із встановленим колесом для моделювання в'язкого опору та без такого колеса; b_L та b_E параметри в'язкого опору еквівалентної електромеханічної системи із встановленим колесом для моделювання в'язкого опору та без такого колеса; φ та t половина кута повороту, який має бути напрацьованим, та час, протягом якого має бути відпрацьований увесь кут повороту.

Оптимальний режим руху (5.56) порівнюємо із рухом з постійною швидкістю:

$$\omega = 2 \frac{\Phi}{t}, \quad (5.57)$$

де ω – постійна кутова швидкість, яка забезпечує відпрацювання потрібного кута повороту за необхідний час.

Витрати енергії при русі еквівалентної електромеханічної системи:

$$A^{(opt)} = U_L^{(opt)} I_L^{(opt)} \frac{\Phi}{\omega_L^{(opt)}} + U_E^{(opt)} I_E^{(opt)} \frac{\Phi}{\omega_E^{(opt)}}, \quad (5.58)$$

$$A = U_L I_L \frac{\Phi}{\omega} + U_E I_E \frac{\Phi}{\omega}, \quad (5.59)$$

де $A^{(opt)}$ та A – витрати електричної енергії при оптимальних швидкостях (5.56) та при постійній швидкості (5.57) еквівалентної електромеханічної системи; $U_L^{(opt)}$ та $I_L^{(opt)}$ – напруження та сила струму при русі із оптимальною швидкістю (5.56) еквівалентної електромеханічної системи із встановленим колесом для моделювання в'язкого опору; $U_E^{(opt)}$ та $I_E^{(opt)}$ – напруження та сила струму при русі із оптимальною швидкістю (5.56) еквівалентної електромеханічної системи без встановленого колеса для моделювання в'язкого опору; U_L та I_L – напруження та сила струму при русі із постійною швидкістю (5.57) еквівалентної електромеханічної системи із встановленим колесом для моделювання в'язкого опору; U_E та I_E – напруження та сила струму при русі із постійною швидкістю (5.57) еквівалентної електромеханічної системи без встановленого колеса для моделювання в'язкого опору.

Економію електричної енергії можна оцінити таким чином:

$$E = \left(1 - \frac{A^{(opt)}}{A} \right) 100\% , \quad (5.60)$$

де E – відсоткова відносна економія електричної енергії.

Підстановка виразів (5.58) та (5.59) до формули (5.60) приведе до такого результату:

$$E = \left(1 - \frac{U_L^{(opt)} I_L^{(opt)} / \omega_L^{(opt)} + U_E^{(opt)} I_E^{(opt)} / \omega_E^{(opt)}}{U_L I_L / \omega + U_E I_E / \omega} \right) 100\% . \quad (5.61)$$

З урахуванням співвідношення (5.59) маємо таке:

$$\omega_L^{(opt)} = \frac{2\pi}{A\tau_L^{(opt)}} , \quad \omega_E^{(opt)} = \frac{2\pi}{A\tau_E^{(opt)}} , \quad \omega = \frac{2\pi}{A\tau} , \quad (5.62)$$

де $\tau_L^{(opt)}$, $\tau_E^{(opt)}$ та τ – проміжки часу між імпульсами, відповідні кутовим швидкостям $\omega_L^{(opt)}$, $\omega_E^{(opt)}$ та ω .

Завдяки співвідношенням (5.62) результат (5.61) набуде вигляду:

$$E = \left(1 - \frac{U_L^{(opt)} I_L^{(opt)} \tau_L^{(opt)} + U_E^{(opt)} I_E^{(opt)} \tau_E^{(opt)}}{(U_L I_L + U_E I_E) \tau} \right) 100\% . \quad (5.63)$$

Електричні напруги та струми, що містяться в формулі (5.63), мають вимірюватись за допомогою відповідних приладів – вольтметрів та амперметрів, а значення $\tau_L^{(opt)}$, $\tau_E^{(opt)}$ та τ мають забезпечуватись за допомогою осцилографа. Для визначення значень $\tau_L^{(opt)}$, $\tau_E^{(opt)}$ та τ введемо таке позначення:

$$\tau_{\frac{1}{2}} = \frac{2\pi}{A\varphi/t}, \quad (5.64)$$

де $\tau_{\frac{1}{2}}$ – числовий параметр.

Завдяки введеному параметру (5.64), співвідношенням (5.62) та виразам (5.56), (5.57) матимемо наступні значення:

$$\tau_L^{(opt)} = \frac{\tau_{\frac{1}{2}}}{1 + \sqrt{b_E/b_L}}, \quad \tau_E^{(opt)} = \frac{\tau_{\frac{1}{2}}}{1 + \sqrt{b_L/b_E}}, \quad \tau = \frac{\tau_{\frac{1}{2}}}{2}. \quad (5.65)$$

Отже, дослідження ефекту економії електричної енергії за рахунок вибору швидкості руху зводиться до вибору значень параметра $\tau_{\frac{1}{2}}$, визначення значень (5.65), та виконання випробувань для вимірювання електричних напружень та струмів, які необхідні для виконання розрахунків за формулою (5.63).

Зрозуміло, що параметр $\tau_{\frac{1}{2}}$ має бути узгодженим із характеристиками досліджуваної еквівалентної електромеханічної системи, і в якості таких значень рекомендується множити удвічі відповідні значення, що наведені у табл. 5.1 та табл. 5.2.

Для цього на мові програмування Python розроблено програму, яка для прийнятого значення $\tau_{\frac{1}{2}}$, для визначених параметрів досліджуваної еквівалентної електромеханічної системи (5.53)–(5.55) та для значень параметру в'язкого опору із табл. 5.3 обчислює значення (5.83) та відповідні їм значення електричного струму для забезпечення налаштування експериментальної установки при проведенні випробувань.

Текст такої програми наведений у дод. Z, а вибір мови програмування обумовлений зручністю використання планшету в умовах лабораторії (рис. 5.11). результати розрахунків наведені в табл. 5.4.

Зрозуміло, що значення τ займає проміжне значення між оптимальними значеннями $\tau_E^{(opt)}$ та $\tau_L^{(opt)}$.

Результаті вимірювань при проведенні випробувань, відповідних значенням $\tau_L^{(opt)}$, $\tau_E^{(opt)}$ та τ із табл. 5.4, наведені в табл. 5.5.

Зрозуміло, що за такого обсягу результатів для розрахунку за формулою (5.63) доцільно створити спеціальну програму, яка розроблена мовою програмування Python та наведена у додатку Б.

Результати, що отримані для відносної відсоткової економії електроенергії за даними табл. 5.5 та формулою (5.63), наведені в табл. 5.6 та наочно свідчать про ефект економії електричної енергії.

Таблиця 5.4 – Розрахункові інтервали між імпульсами

Параметр $\tau_{\frac{1}{2}}$, мс	Відповідні параметру значення, мс		
	$\tau_L^{(opt)}$	$\tau_E^{(opt)}$	τ
50	26,001748220345807	23,998251779654193	25,0
44	22,88153843390431	21,118461566095693	22,0
40	20,801398576276647	19,198601423723357	20,0
35	18,201223754242065	16,798776245757935	17,5

Таблиця 5.5 – Результати вимірювання параметрів, які визначають економію електроенергії

Вимірювана величина	Значення вимірюваних величин, відповідні параметру $\tau_{\frac{1}{2}}$, мс			
	50	44	40	35
$U_L^{(opt)}$, В	3,14	3,49	3,85	4,51
$I_L^{(opt)}$, мА	80	84	85	91
$\tau_L^{(opt)}$, мс	26	22,75	20,77	18,2
$U_E^{(opt)}$, В	3,47	3,79	4,1	4,81
$I_E^{(opt)}$, мА	80	81	84	87
$\tau_E^{(opt)}$, мс	24	21,11	19,2	16,8
U_L , В	3,31	3,6	3,99	4,75
I_L , мА	81	85	86	92
U_E , В	3,38	3,7	4,01	4,78
I_E , мА	79	83	84	92
τ , мс	25	22	20	17,5

Таблиця 5.6 – Результати розрахунків відносної економії електроенергії

Величина	Значення вимірюваних величин, відповідні параметру $\tau_{\frac{1}{2}}$, мс			
	50	44	40	35
E , %	1,380225366	2,507755668	1,398110974	3,390979898

5.3 Висновки за п'ятим розділом

В якості узагальнених підсумків даного розділу можемо сказати, що математичне моделювання електромеханічних процесів в транспортних засобах-шатлах зводиться до побудови та розв'язування відповідної системи

звичайних нелінійних диференціальних рівнянь із початковими умовами. Не завжди вдається отримати точні розв'язки таких диференціальних рівнянь, тому велике значення має використання відповідних обчислювальних методів. Хоча обчислювальні методи приводять до наближених розв'язків, але шляхом зменшення кроку інтегрування можна досягти непомітної відмінності із відповідним точними розв'язками. В той же час, обґрунтування достовірності диференціальних рівнянь математичних моделей, що отримані в межах певної схематизації можна лише шляхом відповідних натурних випробувань та вимірювань.

Показано, що для дослідження процесів в транспортувальному засобі-шатлі досить зручно використовувати вільне програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом за рахунок спрощених ліцензійних умов. В той же час, при використанні такого програмного забезпечення слід передбачати можливість обґрунтування достовірності результатів комп'ютерного моделювання, оскільки спрощені ліцензійні умови використання не дають гарантій щодо коректного використання.

При використанні обчислювальних методів, диференціальні рівняння із початковими умовами математичних моделей електромеханічних процесів слід представляти у канонічному вигляді системи диференціальних рівнянь першого порядку, хоча рішення Лагранжа 2-го роду приводять до системи диференціальних рівнянь другого порядку при моделюванні електромеханічних систем. У випадку великої кількості узагальнених координат для забезпечення більшої деталізації перехід до еквівалентної канонічної форми диференціальних рівнянь може містити певні складності при використанні вільного програмного забезпечення. Для обґрунтування достовірності результатів комп'ютерного моделювання електромеханічних процесів в транспортувальному засобі-шатлі пропонується використовувати теоретично встановлені властивості розв'язки диференціальних рівнянь математичної моделі, які мають місце в певних окремих випадках. Для цього

запропоновано використовувати наявність усталених розв'язків у випадку сталої електричної напруги живлення рушійних електричних двигунів та отримано відповідні усталені значення кутової швидкості коліс та сили струму в обмотуванні ротору електричних двигунів для миттєво поданої заданої сталої напруги живлення. На прикладі дослідження електромеханічних процесів при зрушенні з місця автоматичного транспортувального засоба-шатла показано, що протягом часу наближені розв'язки збігаються із теоретично передбаченими усталеними значеннями, що свідчить про коректне використання вільного програмного забезпечення Scilab щодо комп'ютерного моделювання електромеханічних процесів в транспортувальному засобі-шатлі.

Для перевірки достовірності побудованих диференціальних рівнянь математичної моделі електромеханічних процесів в транспортувальному засобі-шатлі запропоновано побудова експериментальної установки для дослідження еквівалентної за виглядом диференціальних рівнянь електромеханічної системи у вигляді електричного двигуна постійного струму із редуктором та із колесом випробувальним для моделювання в'язкого опору. Дослідження електромеханічних процесів в такій системі зведено до вимірювань напруги живлення та струму в ланцюзі обмотування ротору електричного двигуна, а також у вимірюванні кутової швидкості валу редуктора. Результати вимірювань повністю підтвердили теоретично передбачений вигляд залежностей струму та кутової швидкості від напруги живлення, що підтверджує достовірність розробленої математичної моделі електромеханічних процесів для певних класів та типорозмірів автоматичних транспортувальних засобів-шатлів.

З метою оцінки економії електричної енергії за рахунок вибору оптимальних швидкостей навантаженого та порожнього автоматичного транспортувального засобу-шатла на експериментальній установці, яка відтворює еквівалентну електромеханічну систему, було здійснено відповідні

натурні випробування, відповідні різним середнім швидкостям руху. Результати вимірювань, що отримані при проведенні таких натурних випробувань, свідчать про економію електричної енергії за рахунок вибору оптимальних швидкостей в межах приблизно від 1,4% до 3,4 % у залежності від середньої швидкості. Такі результати підтверджують можливість економії електричної енергії за рахунок вибору оптимальних швидкостей навантаженого та порожнього автоматичного транспортувального засобу-шатлу при експлуатації. В той же час, такі експерименти мають бути продовженими з використанням більш досконалого устаткування та вимірювальних приладів для більш ретельного дослідження питань щодо економії електричної енергії, у тому числі у зв'язку із величиною середньої швидкості.

Перелік використаних джерел у даному розділі наведено у повному списку використаних джерел під номерами: [21, 24, 26, 56-58, 90, 115-121.]

Матеріали цього розділу опубліковано в роботах автора [2, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 14], що наведено в додатку И.

ВИСНОВКИ

У роботі, на підставі отриманих результатів, вирішено актуальну науково-практичну задачу удосконалення систем автоматизації у внутрішньоскладській логістиці, з урахуванням вимог енергоефективності, шляхом розроблення моделей та методів автоматичного керування транспортувальними засобами-шатлами.

Для досягнення поставлених завдань проведено аналіз та систематизацію моделей та методів, конструктивних особливостей автоматизованих логістичних складів, принципів їх проєктування та систем керування.

Існуючі моделі та методи не дають можливість враховувати взаємний вплив механічних та електричних складових транспортувальних засобів-шатлів, який ґрунтуються на взаємопов'язаних електромеханічних процесах в системах автоматизації з елементами інтелектуалізації; обирати варіанти керування для забезпечення підвищення енергоефективності та уникнення резонансних явищ в життєвому циклі транспортувального засоба-шатла.

З використанням сучасних підходів теорії автоматичного керування та інженіренгово аналізу, розроблено математичні моделі процесів керування рухом в транспортувальному засобі-шатлі у складській логістиці для розв'язування задач удосконалення систем автоматизації нового покоління.

Розроблено математичну модель транспортувального засоба-шатла на основі електромеханічних аналогій та рівнянь Лагранжа 2-го роду. Запропонована модель представлена у вигляді системи двох нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку із відповідною кількістю початкових умов. Показано що нелінійність диференціальних рівнянь

математичної моделі є наслідком врахування властивостей сили тертя кочення коліс та встановлено можливості лінеалізації диференціальних рівнянь для дослідження окремих режимів руху.

На основі використання ПД-регуляторів було розроблено математичні моделі керування транспортувального засоба-шатла, а саме для забезпечення його руху із заданою швидкістю та для забезпечення точного позиціонування у логістичної системи.

Побудовано математичні моделі автоматичного керування швидкістю та переміщенням транспортувального засоба-шатла з використанням ПД-регуляторів. Ці моделі представлено у вигляді лінійних диференціальних рівнянь третього та четвертого порядків відповідно. На основі запропонованих математичних моделей досліджено амплітудно-частотні характеристики процесів керування (швидкістю та переміщення) та показано можливість наявності резонансних режимів. Отримано умови, яким мають задовольняти параметри конструкцій та ПД-регуляторів транспортувального засоба-шатла, для уникнути резонансних процесів протягом життєвого циклу. Також побудовано математичну модель нелінійного керування транспортувального засоба-шатла з сумісним використанням ПД-регуляторів положення та швидкості, в якій передбачено можливість почергового вмикання та вимикання цих регуляторів за умовою наближення транспортувального засоба-шатла до заданого положення зупинки.

Розроблена математична модель процесів в автоматичному транспортувальному засобі-шатлі при зміні налаштування ПД-регулятора швидкості, у вигляді лінійного диференціального рівняння із початковими умовами та в еквівалентній формі динамічної ланки із відповідною передавальною функцією. Дослідження таких процесів є необхідним інтелектуалізації систем керування складськими логістичними системами.

На основі запропонованих моделей, отримав подальший розвиток метод автоматичного керування рухом транспортувального засоба-шатла,

який ґрунтуються на взаємопов'язаних електромеханічних процесах в системах автоматизації при визначенні параметрів ПД-регуляторів і дозволяє обирати варіанти керування для забезпечення підвищення енергоефективності та уникнення резонансних явищ в життєвому циклі транспортувального засоба-шатла.

Для обґрунтування достовірності результатів проведено комп'ютерне моделювання. На прикладі дослідження електромеханічних процесів при зрушенні з місця автоматичного транспортувального засоба-шатла показано, що протягом часу наближені розв'язки збігаються із теоретично передбаченими усталеним значеннями, що свідчить про коректність запропонованих моделей та методів.

На наступних етапах, експериментальним шляхом, було перевірено достовірність побудованих диференціальних рівнянь математичної моделі електромеханічних процесів в транспортувальному засобі-шатлі. Дослідження електромеханічних процесів в такій системі зведено до вимірювань напруги живлення та струму в ланцюзі обмотування ротору електричного двигуна, а також у вимірюванні кутової швидкості валу редуктора.

Результати вимірювань повністю підтвердили теоретично передбачений вигляд залежностей струму та кутової швидкості від напруги живлення, що підтверджує достовірність розробленої математичної моделі електромеханічних процесів для певних класів та типорозмірів автоматичних транспортувальних засобів-шатлів.

З метою оцінки економії електричної енергії за рахунок вибору оптимальних швидкостей навантаженого та порожнього автоматичного транспортувального засобу-шатла на експериментальній установці, яка відтворює еквівалентну електромеханічну систему, було здійснено відповідні натурні випробування, відповідні різним середнім швидкостям руху. Результати вимірювань, що отримані при проведенні таких натурних

випробувань, свідчать про економію електричної енергії за рахунок вибору оптимальних швидкостей в межах приблизно від 1,4% до 3,4 % у залежності від середньої швидкості.

Отримані результати, в дисертаційному дослідженні, свідчать про позитивний ефект та підвищення енергоефективності, продуктивності, мобільності, автономності технологічних систем автоматичних транспортувальних засобів-шатлів у внутрішньоскладських системах в умовах невизначеності. Ці результати були підтвержені KAPELAU Europe GmbH (Німеччина), що засвідчує отриманий акт експериментального впровадження.

Результати роботи отримали дослідне впровадження в ТОВ «КАПЕЛОУ» (Україна Київ), щодо керованого технологічного процесу функціонування транспортувального засоба-шатла в автоматизованих внутрішньоскладських системах, що базується на використанні регуляторів із інтелектуальними системами, яка базується на обґрунтуванні поточних параметрів виробничих процесів з використанням комп'ютерно-інтегрованих технологій, що дозволило забезпечити економію електричної енергії інтелектуальних транспортних засобів-шатлів за рахунок оптимізації їх швидкості.

Результати роботи були впроваджені у ТОВ «Омега», (Україна, Харківська обл.). Було відзначено працездатність моделей та методів, доцільність та перспективність використання запропонованих моделей та методів для удосконалення та модернізації технічних засобів автоматизації на основі ПІД-регуляторів, за рахунок забезпечення автономності транспортних засобів-шатлів для автоматизації внутрішньоскладських вантажних операцій, шляхом автоматизації керування рухом із точно заданими швидкістю та переміщенням для точного позиціонування, відносно складників логістичної системи, що дало можливість підвищення

енергоефективності, стабільності внутрішньоскладських вантажних операцій.

Відзначено, що експериментальні дослідження та створений випробувальний стенд, можуть бути використані, як база для розробки практичних рекомендацій, щодо удосконалення та модернізації технічних засобів автоматизації у внутрішньологістичному господарстві.

Результати дисертаційних досліджень впроваджені у навчальному процесі на кафедрі електронних апаратів Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського, на кафедрі інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», а також у науково-дослідних роботах і навчальному процесі на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки ХНУРЕ, що підтверджено відповідними документами.

Результати роботи можна віднести до Цілей сталого розвитку: Ціль 8. Гідна праця та економічне зростання та Ціль 9 та «Промисловість, інновації та інфраструктура».

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Топ 7 трендів у логістиці 2023 року. URL: <https://haski.ua/blog/logistic/logistychni-trendy-2023-roku> дата звернення 1.06.2024.
2. ТОП-15 найбільших логістичних компаній України в 2023 році. URL: <https://wareteka.com.ua/uk/blog/logistichnih-kompanij-ukrayini-rejting/> дата звернення 3.06.2024.
3. Перша українська спеціалізована платформа для гравців ринку складської логістики. Заголовок з екрану. Режим доступу: URL: <https://wareteka.com.ua/uk/blog/logistichnih-kompanij-ukrayini-rejting/> дата звернення 4. 06.2024
- 4 S. Zhu and G. Du, "Evaluation of the Service Capability of Maritime Logistics Enterprises Based on the Big Data of the Internet of Things Supply Chain System," in *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 12, no. 2, pp. 100-108, 1 March 2023, doi: 10.1109/MCE.2022.3150270.
5. Портал відкритих даних. Офіційний портал. URL: <https://data.gov.ua/> дата звернення 1.06.2024
6. Вознюк І.В. Тенденції розвитку складської логістики з використанням cross-docking // XXIV Міжнародна науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених "Політ. Сучасні проблеми науки". 03 квітня 2024. К.: НАУ, 2024. С. 98-99.
7. Смесова, В., & Яськов, Є. (2024). Інвестиційна привабливість економіки України: сучасний стан та рейтингове оцінювання. *Економіка та суспільс тво*, (64). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-64-66>
8. Vzhesnievskyi M. Автоматизація внутрішньо-складських виробничих логістичних процесів для впровадження концепції industry 4.0: енергоощадливість, продуктивність, мобільність, модульність, автономність /

М. Vzhesnievskiy, O. Chala // *Системи управління, навігації та зв'язку*. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2024. – Т. 2 (76). – С. 34-38. – doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.2.034>.

9. Основи наукових досліджень: *підручник* / І. Ш. Невлюдов, Ю. М. Олександров, А. О. Андрусевич, О. О. Чала ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Prague : OKTAN PRINT, 2024. – 468 с. – ISBN 978-80-88618-68-3 ; DOI: [10.46489/ONDNP-24-12](https://doi.org/10.46489/ONDNP-24-12)

10. Невлюдов І. Ш. Трансфер технологій у сучасній науці, освіті та виробництві в умовах четвертої промислової революції «ІНДУСТРІЯ 4.0» / Невлюдов І. Ш., Чала О. О., Олександров Ю. М. // *Сучасний рух науки: тези доп. VIII міжнародної науково-практичної інтернетконференції, 3-4 жовтня 2019 р.* – Дніпро, 2019. – Т.2 С.: 604-608

11. Нова Пошта. Фрахтова логістика для вашого бізнесу. Офіційна сторінка Нова Пошта. URL: https://novaposhta.ua/freight_transportation_ua/ дата звернення 1.06.2024.

12. KAPELOU. Наші проекти. Офіційна сторінка KAPELOU. Заголовок з екрану URL: <https://kapelou.com/> дата звернення 1.06.2024.

13. Запровадьте інновації з SBRobotics. Змінюймо майбутнє разом! URL: <https://sbrobotics.ua/> дата звернення 1.06.2024.

14. Sklad servis/ Офіційна сторінка/ Заголовок з екрану. URL: <https://ssk.ua/ua> дата звернення 3.06.2024.

15. Складська логістика : навчальний посібник / В. Є. Марчук, М. Ю. Григорак, О. М. Гармаш, О. В. Овдієнко. Київ: ОЛДІ-ПЛЮС, 2020. 256 с. ISBN 978-966-289-413-4.

16. Моделі та методи кіберфізичних виробничих систем в концепції Industry 4.0: монографія / І. Ш. Невлюдов, В. В. Євсєєв, А. О. Андрусевич, С. С. Максимова ; – Oktan Print – Prague. 2023. – 321 с

17. Вжеснєвський М.О. Технічні засоби автоматизації внутрішньоскладських виробничих логістичних процесів // *Матеріали 28-го*

Міжнародного молодіжного форуму «*Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті*». Зб. матеріалів форуму. Т. 2. – Харків: ХНУРЕ. 2024. –С.: 9-10. DOI: <https://doi.org/10.30837/IYF.ASCTREDB.2024.009> .

18. Furlanetto, B. V. R., Marins, F. A. S., Silva, A. F., & Defalque, C. M. (2020) Optimization of a logis-tics network considering allocation of facilities and taxation aspects. *Gestão & Produção*, 27(4), e4918. Retrived from: <https://doi.org/10.1590/0104-530X4918-20> (ac-cessed: 06.10.2023).

19. Beskorovainyi, V., Sudik, A. (2021). Optimization of topological structures of centralized logistics networks in the process of reengineering. *Innova-tive Technologies and Scientific Solutions for Industries*. No. 1 (15). P. 23–31. Retrived from: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.023> (ac-cessed: 06.10.2023).

20. Govindan, K., Fattahi, M., Keyvanshokoo, E. (2017). Supply chain network design under uncer-tainty: A comprehensive review and future re-search directions. *European Journal of Opera-tional Research*, Vol. 263, P. 108–141. Retrived from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221717303429> (acce-ssed: 06.10.2023).

21. Igor Nevliudov, I Nevliudov, A Andrusevich, N Starodubcev, N Demska, M Vzhesnievskyi (2021). Evolutions of group management development of mobile robotic platforms in warehousing 4.0. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 4 (18), 57–64. (фахове видання, категорія Б)

22. Аналіз стратегій зберігання виробів в автоматизованому інтелектуальному складі / І. Ш.Невлюдов, В. В. Євсєєв, Н. П. Демська, М. О. Вжесневський, О. М. Клименко // VII Міжнародна науково-практична конференція «*Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка*»: Тези доповідей. – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2022. – С. 87-88. (тези доповіді).

23. S. Zhu and G. Du, "Evaluation of the Service Capability of Maritime Logistics Enterprises Based on the Big Data of the Internet of Things Supply Chain System," in *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 12, no. 2, pp. 100-108, 1 March 2023, doi: 10.1109/MCE.2022.3150270.

24. Nevliudov, I., Vzhesnievskyi, M., Romashov, Y. i Chala, O. (2023) «Математичне моделювання мехатронних шатлів як об'єктів автоматизації для багаторівневих систем внутрішньоскладської логістики», *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, (4 (26), с. 135–144. doi: 10.30837/ITSSI.2023.26.135. (фахове видання, категорія Б)

25. Yevsieiev, V., & et al. (2023). Conveyor Belt Object Identification: Mathematical, Algorithmic, and Software Support, Volume 17, No. 6 (Nov. 2023), PP:1073-1088 doi:10.18576/amis/170615

26. Nevliudov Igor, Maksymova Svitlana, Chala Olena, Bronnikov Artem, & Vzhesnievskyi Maksym. (2023). Automated Logistics Processes Improvement in Logistics Facilities. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 3(3), 157–170. Retrieved from <https://mjstjournal.com/index.php/mjst/article/view/20>

27. Sanchez Londono, D., Barbieri, G., Fumagalli, L.: Smart retrofitting in maintenance: a systematic literature review. *J. Intell. Manuf. Intell. Manuf.* 34(1), 1–1 (2023).

28. Vladyslav Basiuk, Svitlana Maksymova, Olena Chala, & Olha Miliutina. (2023). Mobile Robot Position Determining Using Odometry Method. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 3(3), 227–234. Retrieved from <https://mjstjournal.com/index.php/mjst/article/view/224>.

29. Vladyslav Yevsieiev, Amer Abu-Jassar, & Svitlana Maksymova. (2024). Object recognition and tracking method in the mobile robot's workspace in real time. *Technical science research in Uzbekistan*, 2(2), 115–124. Retrieved from <https://universalpublishings.com/index.php/tsru/article/view/4385>

30. Чала, О., Сливка, А. (2023) Рівні засобівв IoT в інформаційних технологіях. *Виробництво & Мехатронні Системи: матеріали VII Міжнародної конференції*, Харків, С. 51-60.

31. Shuttle-based Storage and Retrieval System 3D Model Improvement and Development / I. Nevliudov, V. Yevsieiev, S. Maksymova, O. Klymenko, M. Vzheshniewski // *ournal of Natural Sciences and Technologies*. - 2023. - Vol. 2(2). - P. 232-237. (фах. видання закордон)

32. Dashkov D. Motion capture with MEMS sensors / D. Dashkov, O. Liashenko // *Сучасні інформаційні системи = Advanced Information Systems*. – 2023. – Т. 7, № 2. – С. 57-62.

33. Техніка матеріальних потоків логістичних систем: навч. посіб. / О. В. Григоров, Г. О. Аніщенко, В. В. Стрижак та ін. Харків: НТУ «ХП», 2018. 496 с

34. Нечаєв Г. І., Редько А. М. Склади та технологія їх роботи: навч. посіб. Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля. Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2011. 313 с.

35. Михайлов Є. П., Вудвуд О. М. Навчальний посібник з дисципліни «Машини і обладнання складів і логістика». Одеса: Одес. нац. політехн. ун-т, 2019. 227с.

36. Вікович І. А. Транспортні навантажувально-розвантажувальні засоби: підручник. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2018. 678 с.

37. Гончарук О. М., Стрілець В. М., Шинкаренко І. Т. Спеціалізовані транспортні і навантажувально-розвантажувальні засоби на транспорті: навч. посіб. Рівне: НУВГП, 2010. 205 с.

38. Литвиненко С. Л., Нестеренко Г. І., Габрієлова Т. Ю., Яновський П. О. Механізація та автоматизація навантажувально-розвантажувальних робіт: навчальний посібник. Ч. 2. Київ: Видавничий дім «Кондор», 2018. 164 с.

39. Литвиненко С. Л., Нестеренко Г. І., Габрієлова Т. Ю., Яновський П. О. Механізація та автоматизація навантажувально-розвантажувальних робіт: навчальний посібник. Ч. 3. Київ: Видавничий дім «Кондор», 2018. 152 с

40. Загорянський В. Г., Мороз М. М., Гайкова Т. В., Цимбал О. В. Удосконалення методики проектування контейнерного терміналу. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2023. № 2(18). С. 56–62.

41. Pascual Cortés Pellicer, Faustino Alarcón Valero (2018). Identification of Reverse Logistics Decision Types from Mathematical Models. *Journal of Industrial Engineering and Management*. No. 11 (2). P. 239–249. Retrived from: <https://www.jiem.org/index.php/jiem/article/view/2530> (accessed: 06.10.2023).

42. Аулін В. В., Гриньків А. В., Головатий А. О., Лисенко С. В., Голуб Д. В., Кузик О.В., Тихий А. А. Методологічні основи проектування та функціонування інтелектуальних транспортних і виробничих систем: *монографія* під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. – Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2020. – 428с. ISBN 978-617-7813-27-8

43. Інтелектуальні системи автоматизації / Аврунін О. Г., Владов С. І., Петченко М. В., Семенець В. В., Татарінов В. В., Тельнова Г. В., Філатов В. О., Шмельов Ю. М., Шушляпіна Н. О. *монографія* – Кременчук : Видавництво «НОВАБУК», 2021. – 322 с

44. Оптимальне керування в електромеханічних системах [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» з дисципліни «Системи оптимального та інтелектуального керування» / О. І. Толочко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2865 кБ). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 116 с.

45. Автоматизовані електромеханічні системи : конспект лекцій / укладачі: Черв'яков В. Д., Леонтьєв П. В., Соколов С. В. – Суми: Сумський державний університет, 2022. – 253 с

46. Petrov, K. E., & Kyrychenko, V. V. (2023). REMOVAL OF RAIN COMPONENTS FROM SINGLE IMAGES USING A RECURRENT NEURAL NETWORK. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (2), 91. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2023-2-10>.

47. Безкоровайний В. В., Русскін В. М., Тітов С. В. Математична модель задачі оптимізації логістичних мереж в умовах інтервальної визначеності вхідних даних. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*, 2023. №102. С. 95-103.

48. Козорог І. Г. Дослідження та аналіз використання логістичних моделей в вантажоперевезеннях / І. Г. Козорог ; наук. керівник к. т. н., доц. Т. Г. Білова // *Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті: матеріали 28-го Міжнар. молодіж. форуму*, 16–18 квітня 2024 р. – Харків : ХНУРЕ, 2024. – Т. 6 – С. 818-820. – DOI : <https://doi.org/10.30837/IYF.IIS.2024.818>.

49. Нефьодов Л. І., Невлюдов І. Ш., Безкоровайний В. В. CALS-технології і системи: навч. посібник. Харків: ХНУРЕ, 2021. 272 с.

50. Математичне моделювання систем: навч. посіб. / І. І. Обод, Г. Е. Заволодько, І. В. Свид. Харків: Друкарня МАДРИД, 2019. 268 с.

51. Nevliudov, I., Vzhesnievskiy, M., Romashov, Y. і Chala, O. (2023) «Математичне моделювання мехатронних шатлів як об'єктів автоматизації для багаторівневих систем внутрішньоскладської логістики», *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, (4 (26), с. 135–144. doi: 10.30837/ITSSI.2023.26.135.

52. Automation of Mathematical Modeling of Physical and Technological Processes in the Electronic Devices Manufacture / I. Nevliudov, O. Chala, I. Botsman, Oleksandr Klymenko, Maksym Vzhesnievskiy. // *Functional Basis of Nanoelectronics: proceedings of the XII International Scientific Conference*, Odessa, September 20-24, 2021. – Odessa, 2021. – P. 74-77.

53. Nevlyudov I., Novoselov S., Klymenko O., Vzhesnievskyi M. Design and study of gateway operating modes for industrial internet things / *International independent scientific journal* №33/2021 – pp. 75-78.

54. Bezkorovainyi V. V., Nefodov L. I., Russkin V. M. (2021) Matematychna model strukturno-topolohichnoi optymizatsii lohistychnykh merezh [Mathematical model of structural and topological optimization of logistics networks]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu*, 4, 26–33 [in Ukrainian]. Retrived from: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.95.0.178.

55. Beskorovainyi V., Draz O. (2021) Mathematical models of decision support in the problems of logistics networks optimization. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 4 (18), 5–14. Retrived from: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.18.005> .

56. Nevliudov, I., Andrusevich, A., Starodubcev, N., Demska, N., Vzhesnievskyi, M. (2022) Choice of informative attributes for monitoring of the electronic components of automatics lifecycle. Innovative integrated computer systems in strategic project management, [Text]: *Collective monograph* edited by I. Linde. European University Press. Riga: ISMA, p. 139-150.

57. Shuttle-based Storage and Retrieval System 3D Model Improvement and Development / I. Nevliudov, V. Yevsieiev, S. Maksymova, O. Klymenko, M. Vzhesniewski // *Journal of Natural Sciences and Technologies*. - 2023. - Vol. 2(2). - P. 232-237.

58. Z. Liu, H. Wang, H. Wei, M. Liu and Y. -H. Liu, "Prediction, Planning, and Coordination of Thousand-Warehousing-Robot Networks With Motion and Communication Uncertainties," in *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 18, no. 4, pp. 1705-1717, Oct. 2021, doi: 10.1109/TASE.2020.3015110.

59. Maksymova S., Nevliudov I., Yevsieiev V., Klymenko O., & Vzhesniewski M. (2023). Shuttle-based storage and retrieval system 3d model

improvement and development. *Journal of Natural Sciences and Technologies*, 2(2), 232–237. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10354730>

60. Features of Wave Algorithm Application in Warehouse Logistics Transport Systems / I. Nevliudov, Maksym Vzhesnievskyi, V. Yevsieiev, S. Maksymova S. et all // *Information systems in project and program managemen : collective monograph* / ed. by I. Linde ; European University Press. – Riga : ISMA, 2023.

61. Beskorovainyi V., Draz O. (2021) Mathematical models of decision support in the problems of lo-gistics networks optimization. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 4 (18), 5–14. Retrived from: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.18.005>.

62. Beskorovainyi, V., Kolesnyk, L., Yevstrat D. (2022) Formalization of the problem of transport logistics optimization networks at the stage of reengineering. *Innovative Technologies and Sci-entific Solutions for Industries*, 2, 20, 5–13. Retrived from: <https://journals.uran.ua/itssi/article/view/262022> (accessed: 12.10.2024).

63. Комп'ютерне моделювання процесів та систем. Чисельні методи: підручник / С. П. Вислоух, О. В. Волошко, Г. С. Тимчик, М. В. Філіппова. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. 228 с.

64. Jiang C., Han X., Xie H. (2021) The Basic Princi-ples of Interval Analysis. *Nonlinear Interval Op-timization for Uncertain Problems*, 25–34. Retrived from: https://doi.org/10.1007/978-981-15-8546-3_2

65. Rubio S., Jiménez-Parra B., Chamorro-Mera A., Miranda F. J. (2019) *Reverse Logistics and Urban Logistics: Making a Link. Sustainability*, 11, 20. Retrived from: <https://doi.org/10.3390/su112056-84>.

66. Вжеснєвський М. О. Розробка кінематичної схеми транспортувального шатлу для внутрішньоскладської виробничої логістики / М. О. Вжеснєвський, О. О. Чала, Ю. В. Ромашов // *матеріали І-ї*

Всеукраїнської конференції Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки. – Харків, 2024. – С. 6-10.

67. Застосування рівнянь Лагранжа II рода до рішення задач динаміки механічних систем. Методичні рекомендації до розділу курсу «Спецрозділи математики, теоретичної кінематики та аналітичної динаміки» для студентів всіх форм навчання. – Автори: В.А. Ропай, О.Г. Науменко, В.Я. Киба. – Д.: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 2013.-56 с.

68. Kovtun T. (2020) A model of closed circuits forming in a logistics system with feedback. *In-novative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 4 (14), 113–120. Retrived from: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.113>.

69. Rodríguez J. V., Niño J. P. C., Negrete K. A. P. [etc.] (2022) Optimization of the distribution lo-gistics network: a case study of the metalworking industry in Colombia. *Procedia Computer Sci-ence*. 198, 524–529.

70. Gattuso D., Cassone G. C., Pellicanò D. S. (2014) A Micro-simulation Model for Performance Evaluation of a Logistics Platform. *Transportation Research Procedia*, 3, 574–583. doi.org/10.1016/j.trp-ro.2014.10.036.

71. Maksymova, Svitlana, et al. Comparative Analysis of methods for Predicting the Trajectory of Object Movement in a Collaborative Robot-Manipulator Working Area. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 2024, 4.10: 5-15.

72. Beskorovainyi V., Kuropatenko O., Gobov D. (2019) Optimization of transportation routes in a closed logistics system. *Innovative Technolo-gies and Scientific Solutions for Industries*, 4 (10), 24-32.

73 Yang T., Wang W. (2022) Logistics Network Dis-tribution Optimization Based on Vehicle Sharing, *Sustainability*, 14, 2159. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14042159>

74. Поляк І. Є., Борисов О. В., Мацаєнко А. М. Моделювання підресореної частини мобільного транспортного засобу. *Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки*. 2023. 3, 66-73. <https://doi.org/10.58254/viti.3.2023.08.66>

75. Kosheleva O., Kreinovich V., Pham. U. (2021) Decision-making under interval uncertainty revis-ited. *Asian Journal of Economics and Banking*, 5, 1, 79–85. Retrived from: <https://doi.org/10.1108/AJEB-07-2020-0030> (ac-cessed: 11.10.204).

76. Beskorovainyi V., Imanhulova Z. (2017) Tech-nology of large-scale objects system optimiza-tion. *ECONTECHMOD*, 06, 4, 3–8.

77. Research of Existing Methods of Representing a Collaborative Robot-Manipulator Environment within the Framework of Cyber-Physical Production Systems. (2024). *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(9), 112-120. <https://mjstjournal.com/index.php/mjst/article/view/1855>

78. Лісовець, С. М. та інші (2023). Використання цифрового ПД-регулятора в контурі керування електромеханічним приводом промислового робота. *ВЧЕНІ ЗАПИСКИ*, 8 Том 34 (73) № 1 2023, С.113-118. 52023161. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/17>

79. Alyokhina S., Nevliudov I., Romashov Y. Safe Transportation of Nuclear Fuel Assemblies by Means of Wheeled Robotic Platforms // *Ядерна та радіаційна безпека*. – 3(91). – 2021. – р. 43-50. DOI:10.32918/nrs.2021.3(91).05.

80. Gruyitch L.T. Control of Linear Systems: Trackability and Tracking of General Linear Systems (1st ed.). – *Voca Raton: CRC Press*, 2018. – 396 p.

81. Іванов А. О. Теорія автоматичного керування: Підручник. — Дніпропетровськ: Національний гірничий університет. 2003. 250 с.

82. Енциклопедія кібернетики. тт. 1, 2. Київ: Головна редакція УРЕ, 1973. 584 с.

83. Папушин Ю. Л., Білецький В. С. Основи автоматизації гірничого виробництва. Донецьк : *Східний видавничий дім*, 2007. 168 с. ISBN 978-966-317-004-6.

84. Tovey C.A. *Linear Optimization and Duality: A Modern Exposition* (1sted.). – *New York: Chapman and Hall/CRC*, 2020. – 585 p.

85. Складська логістика: навчальний посібник / В. Є. Марчук, М. Ю. Григорак, О. М. Гармаш, О. В. Овдієнко. Київ: *ОЛДІ-ПЛЮС*, 2020. 256 с. ISBN 978-966-289-413-4

86. Ahmed, A.A., Moharam, B.A., Rashad, E.E.: Improving energy efficiency and economics of motor-pump-system using electric variable-speed drives for automatic transition of working points. *Comput. Electr. Eng.* 97, 107607 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107607>

87. Alanazi, F.: Electric vehicles: benefits, challenges, and potential solutions for widespread adaptation. *Appl. Sci.* 13(10), 6016 (2023). <https://doi.org/10.3390/app13106016>

88. He, Z.Z., Zhang, J.Y., Zheng, F.Y., Jin, X.J.: Energy-efficiency-oriented optimal control for electrical environmental control system based on advanced neural network. *Appl. Therm. Eng.* 219(C), 119635 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119635>

89. Padmanabha, M., Kobelski, A., Hempel, Arne-Jens, Streif, S.: Modelling and optimal control of growth, energy, and resource dynamics of *Hermetia illucens* in mass production environment. *Comput. Electron. Agric.* 206, 107649 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107649>

90. М. Вжеснівський Інтелектуальне керування автономними транспортними шатлами для внутрішньо-складських логістичних систем // *Виробництво & Мехатронні Системи 2024*: матеріали VIII-ої Міжнародної конференції, Харків, 25-26 жовтня 2024 р.: тези доповідей /. Харків: [електронний друк], 2024. С.: 117-119.

91. Waltersmann, L., Kiemel, S., Stuhlsatz, J., Sauer, A., and Miede, R.: Artificial intelligence applications for increasing resource efficiency in manufacturing companies a comprehensive review. *Sustainability* 13(12), 6689 (2021). <https://doi.org/10.3390/su13126689>.

92. M. AIZERMAN, Theory of Automatic Control, *Pergamon Press*, Oxford, UK, 1st ed., 1963.

93. Невлюдов, І.Ш. Автоматичне управління технологічними об'єктами [Текст]: підручник / І.Ш. Невлюдов, О.В.Токарева. – Харків: ХНУРЕ, 2018.–190 с.

94. Клименко О. М. Аналіз методів управління автономною робототехнічною транспортною системою фармацевтичного виробництва / О. М. Клименко // *Computer-integrated technologies, automation and robotics 2024: proceedings of the I st All-Ukrainian Conference*, Kharkiv, May 16-17, 2024. – Kharkiv, 2024. – P. 29-31.

95. Т. Ковтун. (2020). Життєвий цикл та продукти проекту екологістичної системи. // *Управління розвитком складних систем*, (44), 27–33. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.44.27-33>

96. Мартиненко І. І. Проектування систем електрифікації та автоматизації АПК: Підручник / І. І. Мартиненко, В. П. Лисенко, Л. П. Тищенко, І. М. Болбот, П. В. Олійник. – К.: НМЦ Мінагропрому України, 2008 – 330 с

97. Garasumiv, V. M. (2020). Algorithm of adjustment of sub-regulator coefficients with fuzzy logic methods using . *METHODS AND DEVICES OF QUALITY CONTROL*, (2(45), 102–108. [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2020-2\(45\)-102-108](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2020-2(45)-102-108)

98. Valery I Korobov, Katerina V Sklyar, Svetlana Y Ignatovich, Almost feedback linearizable systems of the class C1 and solving the constructive controllability problem, *IMA Journal of Mathematical Control and Information*,

Volume 41, Issue 2, June 2024, Pages 356–377,
<https://doi.org/10.1093/imamci/dnae014>

99. A. Marusin, H. Tian, R. Safiullin, R. Safiullin and I. Marusina, "Integral Evaluation of the Effectiveness of the Implementation of Automated Technical Means of Controlling the Movement of Vehicles on the Road," 2022 *International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*, Vienna, Austria, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/EMCTECH55220.2022.9934048.

100. M. Newman and M. Khoshdarregi, "Automatic Structural Identification and Vibration Suppression of Industrial Robots using a Custom Active Damper," 2022 *22nd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, Jeju, Korea, Republic of, 2022, pp. 1033-1038, doi: 10.23919/ICCAS55662.2022.10003880.

101. J. G. Rueda-Escobedo, E. Fridman and J. Schiffer, "Data-Driven Control for Linear Discrete-Time Delay Systems," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 67, no. 7, pp. 3321-3336, July 2022, doi: 10.1109/TAC.2021.3096896.

102. A. Diveev and A. Barabash, "Machine Learning by Symbolic Regression for Automatic Synthesis of Universal Stabilization System of Motion," 2024 *32nd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, Chania - Crete, Greece, 2024, pp. 783-788, doi: 10.1109/MED61351.2024.10566188.

103. R. Betala and S. P. Nangrani, "Comparison of Performance of Fractional Order PID Controller with Conventional Controller for Industrial Applications," 2023 *IEEE International Conference on Integrated Circuits and Communication Systems (ICICACS)*, Raichur, India, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICICACS57338.2023.10099955.

104. M. Nakonechnyi, O. Ivakhiv, R. Velgan, M. Geraimchuk and O. Viter, "Investigation of the Control Law Influence on the Dynamic Characteristics of

Vehicle Movement Control System Model," *2020 21st International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*, Cracow, Poland, 2020, pp. 1-8, doi: 10.1109/REM49740.2020.9313908.

105. 5 тенденцій майбутнього розвитку пристроїв для логістики та транспорту. Офіційний сайт Всеукраїнської аутсорсингової компанії Хаски а URL <https://itssi-journal.com/index.php/itssi/article/vi-ew/156> (ac-cessed: 1.07.. 2024).

106. Впровадьте автоматизацію прямо зараз. Автономні мобільні роботи (AMRs) Офіційний сайт Юнгхайнріх Ліфт Трак ТОВ Retrived URL: <https://www.jungheinrich.ua> (ac-cessed: 18.09. 2024).

107. Парфентьева, О. (2024). Трансформація ринку логістичних послуг в епоху діджиталізації та сервісизації. *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. Серія «Економічні науки»*, (2 (112), 20-25. <https://doi.org/10.37734/2409-6873-2024-2-3>

108. Bigliardi B., Filippelli S., Petroni A., Tagliente L. (2022) The digitalization of supply chain: a review. *Procedia Computer Science*, vol. 200, pp. 1806–1815. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.381>

109. Tymoshchenko D. (2024) Top logistics technology trends reshaping the industry in 2024. *Acropolium Blogs*. Available at: <https://acropolium.com/blog/top-logistics-technology-trends/> (accessed May 13, 2024).

110. Prieto M., Stan V., Baltas G. (2022) New insights in Peer-to-Peer carsharing and ridesharing participation intentions: Evidence from the “provider-user” perspective. *Journal of Retailing and Consumer Services*, vol. 64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2021.102795>

111. New Mobility Patterns Study: insights into passenger mobility and urban logistics. European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport, December 2022. Available at: <https://transport.ec.europa.eu/news->

events/news/new-mobility-patterns-study-insights-passenger-mobility-and -urban-logistics-2022-12-20_en (accessed May 13, 2024).

112. Б.Я. Керничний Організаційно-економічний механізм управління транспортно-логістичним обслуговуванням промислового підприємства Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 073 «Менеджмент». – Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, Міністерства освіти і науки України, Тернопіль, 2021.

113. Y. Zhang, "Smart Logistics Warehouse Management System Based on RFID and Internet of Things Technology," *2022 2nd International Conference on Networking, Communications and Information Technology (NetCIT)*, Manchester, United Kingdom, 2022, pp. 489-492, doi: 10.1109/NetCIT57419.2022.00121.

114. H G Ferreira, M Santos, J Oliveira et al., "Inventory Automation Using RFID Technology in Romaster Engenharia", *International Journal for Innovation Education and Research*, vol. 8, no. 4, pp. 180-186, 2020.

115. Основи наукових досліджень : підручник / І. Ш. Невлюдов, Ю. М. Олександров, А. О. Андрусевич, О. О. Чала ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Prague : OKTAN PRINT, 2024. – 468 с. DOI <https://doi.org/10.46489/ONDNP-24-12>

116. Analysis of Software Products for Simulation Modeling of the Operation of the System of Shuttles for Warehousing /Igor Nevludov, Vladyslav Yevsieiev, Svitlana Maksymova, Oleksandr Klymenko, Maksym **Vzhesnievskyi** // *Manufacturing & Mechatronic Systems 2022* : proceedings of the VIst International Conference, Kharkiv, October 21-22, 2022 : thesises of reports / [ed. by I. Sh. Nevlyudov (chief editor)] .- Kharkiv : [electronic version], 2022. - P. 24-26.

117. Software development for small details production warehouse automated system Nevliudov Ihor , Maksymova Svitlana , Nevliudova Viktoriia , **Vzhesniewski** Maksym , Klymenko Oleksandr. // *Science in the Environment of*

Rapid Changes: proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference, Brussels, February 6-8, 2023. - Brussels, 2023. - P. 320-323.- Scientific Collection «InterConf».

118. C. Zhai, Y. Li, H. W. Fu, H. Xu, L. Zhou and W. Yao, "The Application of Intelligent Sorting Equipment in Warehouse Logistics," *2023 2nd International Conference on Mechanical Engineering and Power Engineering (MEPE)*, Wuhan, China, 2023, pp. 15-19, doi: 10.1109/MEPE60002.2023.10563181.

119. M. Shahparan, A. Klykov, C. Ananth, A. Odilov and S. Ulug'bekovich, "Qualitative Analysis on Smart Warehouse: From Logistics 4.0 Perspective," *2024 Ninth International Conference on Science Technology Engineering and Mathematics (ICONSTEM)*, Chennai, India, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICONSTEM60960.2024.10568677.

120. B. J. Ma, Y. -H. Kuo, Y. Jiang and G. Q. Huang, "RubikCell: Toward Robotic Cellular Warehousing Systems for E-Commerce Logistics," in *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 71, pp. 9270-9285, 2024, doi: 10.1109/TEM.2023.3327069

121. . Zhao, H. Du, X. Sun and W. Zhu, "Structural Design and Kinematic Analysis of Fully Automated Material Handling Robots for Warehouse Logistics," *2024 3rd Conference on Fully Actuated System Theory and Applications (FASTA)*, Shenzhen, China, 2024, pp. 1259-1264, doi: 10.1109/FASTA61401.2024.10595262.