

*М. О. ВЖЕСНЕВСЬКИЙ, О. О. ЧАЛА***АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМИ РОБОТИЗОВАНИМИ ЗАСОБАМИ-ШАТЛАМИ В ЛОГІСТИЦІ СКЛАДІВ**

Досліджено можливість автоматичного керування транспортними роботизованими засобами-шатлами в логістиці складів з урахуванням вимог енергоефективності, шляхом розробки математичних моделей та методу керування рухом. Особлива увага приділяється дослідженню електромеханічних процесів, що відбуваються в системі керування, що забезпечують оптимальний вибір швидкості руху шатла.

Визначено умови та параметри, що впливають на рух шатлу. Приділено увагу резонансним режимам та методам ймовірності їх виникнення. Математичну модель представлено в декількох еквівалентних формах, що дає змогу вибрати найзручніший варіант для розв'язання конкретного інженерного завдання. Модель можна використати для дослідження різних режимів роботи роботизованого шатла, а також для розроблення й оптимізації систем керування, спрямованих на підвищення енергоефективності та гнучкості логістичних процесів.

Ключові слова: автоматизація, логістика, транспортування, ідентифікація, оптимізація, моделювання, системи підтримки прийняття рішень, функція прийняття рішень, мобільний робот, транспортувальний шатл, розпізнавання об'єктів, проблема лінійності, проблема керуваності.

М. О. VZHESNIEVSKYI, O.O. CHALA**AUTOMATIC CONTROL OF ROBOTIC SHUTTLE VEHICLES IN WAREHOUSE LOGISTICS**

The possibility of automatic control of transport robotic vehicles-shuttles in warehouse logistics, taking into account energy efficiency requirements, through the development of mathematical models and a method of motion control, was studied. Special attention is paid to the study of electromechanical processes taking place in the control system, which ensure the optimal selection of the shuttle speed.

The conditions and parameters affecting the movement of the shuttle are determined. Attention is paid to resonant modes and methods of the probability of their occurrence. The mathematical model is presented in several equivalent forms, which makes it possible to choose the most convenient option for solving a specific engineering problem. The model can be used to study different operating modes of the robotic shuttle, as well as to develop and optimize control systems aimed at increasing energy efficiency and flexibility of logistics processes.

Keywords: automation, logistics, transportation, identification, optimization, modeling, intelligent systems, decision support systems, decision-making function, mobile robot, transport shuttle, object recognition, linearization problem, controllability problem.

1. Вступ.

В умовах сучасного ринку, що характеризується високою конкуренцією, ефективність логістичних процесів відіграє ключову роль в успіху будь-якого підприємства. Оптимізація роботи складів, як найважливішої складової частини логістичної системи, дає змогу істотно знизити витрати і підвищити якість обслуговування клієнтів [1].

Одним із найперспективніших напрямків у розвитку складської логістики є автоматизація та використання роботизованих систем. Автоматичні транспортні роботи-шатли набувають дедалі більшого поширення, забезпечуючи високу швидкість і точність виконання операцій, а також зниження витрат [2].

Однак, впровадження автоматичних робототехнічних шатлів породжує низку нових викликів, пов'язаних із розробкою ефективних систем управління та їхньою інтеграцією в складне динамічне середовище складу.

Ключові проблеми, які необхідно розв'язати під час розроблення систем управління шатлами:

- забезпечення плавного, точного та енергоефективного руху робота-шатла в різних умовах навантаження і зовнішніх впливів;
- запобігання виникненню резонансних явищ, які можуть призвести до пошкодження шатла або обладнання складу;
- інтеграція шатлів у єдину систему управління складом, забезпечуючи їхню координовану роботу та оптимальне виконання завдань.

Таким чином, дослідження розробки моделей та методів роботизованих засобів-шатлів для удосконалення систем автоматизації складської логістики, з урахуванням вимог енергоефективності, є актуальним та своєчасним науково-прикладним завданням.

2. Мета дослідження.

Дослідження спрямовані на розробку моделей та методів автоматичного керування транспортними роботизованими засобами-шатлами в логістиці складів з урахуванням вимог енергоефективності.

Особлива увага приділяється дослідженню електромеханічних процесів, що відбуваються в системі, і розробці алгоритмів керування, що забезпечують оптимальний вибір швидкості руху шатла.

Об'єктом дослідження є процес автоматичного керування транспортувальними роботизованими засобами-шатлами в автоматизованих внутрішньоскладських системах.

Предметом дослідження є параметри керування та математичні, що описують процеси автоматичного керування транспортувальними роботизованими засобами-шатлами.

. Викладення основного матеріалу та результати.

Для створення ефективної системи керування автоматичним роботизованим транспортним засобом-шатлом необхідно розробити математичну модель, яка адекватно описує динаміку руху.

Авторами було використано рівняння Лагранжа 2-го роду для отримання роботизованого моделі шатла. Цей підхід дає змогу врахувати взаємодію механічних та електричних компонентів системи.

Приклад конструктивного оформлення автоматичного транспортувального засоба-шатла, який є різновидом мобільного робота для переміщення вантажів проміж рядами стелажів показаний на рис. 1.



Рис. 1 – Загальний вигляд (а) та внутрішня будова (б) шатла (мобільного робота) для внутрішньо-складського транспортування проміж рядами стелажів, запропонованого фірмою Karpelou [3]

Автоматичний робот-шатл це платформа на чотирьох колесах, на якій з одного боку колеса, що забезпечують рух, а з іншого – підтримку, посередні передбачено платформу для розміщення вантажу.

Рушійні зусилля роботизованого шатлу приводяться в дію електроприводами. Треба відмітити, що такі електроприводи є екологічно безпечними і не забруднюють шкідливими викидами закрите приміщення для складування, не утворюються випари, що дає можливість використовувати такі види роботизованих шатлів на спеціальних складах (наприклад для складування фармацевтичної продукції, а продукції з особливими умовами зберігання) [4].

Такі конструкції, як правило є, в більшості своїй, лише механізованими: до шатлу прикріплено канат, який тягне його, а ось таких роботизованих автоматичних засобів шатлів, наразі, є не багато, вони ще не здобули широкого розповсюдження.

Також нами запропонована така конструкція роботизованого шатлу, де вантаж розташовується по центру конструкції. Саме це дає можливість компактного розташування вузлів з системою з висувом (рис. 2), що ще надає можливість для руху шатлу у двох напрямках без його розвороту.

На рис. 2 представлено розроблені авторами у загальна (а), кінематична (б) схеми та еквівалентна електрична схема електродвигунів (в) роботизованого автономного засоба-шатла.

Під час розроблення моделі особливу увагу приділяли вибору типу електродвигунів, врахуванню сил тертя і в'язкого опору.

Вибір електродвигунів істотно впливає на характеристики руху шатла [6-10], такі як швидкість, прискорення та енергоспоживання. Врахування сил тертя і в'язкого опору важливе для забезпечення точності моделювання, оскільки ці сили впливають на динаміку руху та енергоефективність системи.

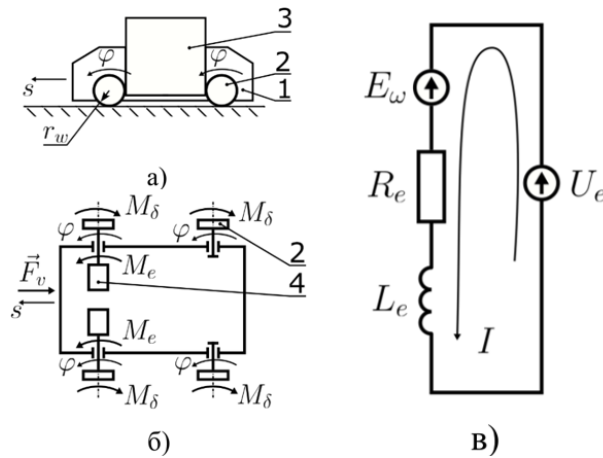
Схеми (рис. 2) та формули (1,2)допомагають зрозуміти взаємозв'язок механічної та електричної частин роботизованого транспортного засобу-шатла, що важливо для побудови його математичної моделі та розробки алгоритмів управління.

Для проведення досліджень було запропоновано математичної моделі з рівнянням руху для механічної системи шатла (1) та (2) рівняння електродинаміки для електродвигуна шатла.

Рівняння (1) описує механічну частину системи шатла. Воно містить момент інерції J і показує, як змінюється кутове прискорення q під впливом сил, зокрема демпфуючої сили: Bq_1 та Bq_2 , електромеханічного

зв'язку і гравітаційної сили $mg\delta$.

Рівняння (2) описує електричну динаміку двигуна, тобто зміну струму q_2 , q_2 обмотках електродвигуна під впливом напруги $U_e(t)$, $U_e(t)$, електричного опору R_{eq1} , R_{eq2} та електро механічного зворотного зв'язку $B_e q_1$, $B_e q_2$



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

Рис. 2 – Загальна (а), кінематична (б) схеми та еквівалентна електрична схема електродвигунів (в) роботизованого автоматичного засоба-шатла внутрішньо-складського транспортування

Тоді, маємо узагальнені сили для роботизованого транспортувального засоба-шатла в такому вигляді, що описує та відповідає запропонованій схематизації на рис. 2:

$$J\ddot{q}_1 = -B\dot{q}_1 + 2B_e\dot{q}_2 - mg\delta, \quad (1)$$

$$L_e\ddot{q}_2 = -B_e\dot{q}_1 - R_e\dot{q}_2 + U_e(t). \quad (2)$$

Отримана математична модель дає змогу дослідити перехідні процеси, що виникають під час зміни швидкості, прискорення або напрямку руху роботизованого автономного шатла.

Аналіз цих процесів дає змогу визначити оптимальні параметри керування, що забезпечують плавність руху та мінімізацію енерговитрат.

На основі аналізу перехідних процесів можна оптимізувати рух шатла для підвищення ефективності та енергозбереження.

На подальших етапах важливим аспектом моделювання є врахування нелінійності, зумовленої, наприклад, властивостями сили тертя кочення.

Для розв'язання цієї проблеми можна використовувати методи лінеаризації для окремих режимів руху, що спрощує аналіз і дає змогу отримати аналітичні рішення для деяких задач

Перевагою таких підходів є те, що розроблену математичну модель представлено в декількох еквівалентних формах (3-5) що дає змогу вибрати найзручніший варіант для розв'язання конкретного інженерного завдання. Модель можна використати для дослідження різних режимів роботи роботизованого шатла, а також для розроблення й оптимізації систем керування, спрямованих на підвищення енергоефективності та гнучкості логістичних процесів.

$$\omega(t_0) = \omega_0, \quad I(t_0) = I_0. \quad (3)$$

$$\dot{q}_1 = \omega(t), \quad \dot{q}_2 = I(t), \quad q_1(t_0) = \varphi_0, \quad q_2(t_0) = \kappa_0. \quad (4)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = -B\omega + 2B_e I - mg\delta, \quad L_e \frac{dI}{dt} = -B_e \omega - R_e I + U_e(t) \quad (5)$$

На основі огляду конструкції роботизованого транспортувального засобу-шатла розроблено його схематизацію у вигляді електро механічної 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 електро механічних аналогій у вигляді системи двох звичайних 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 лінералізованих 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

Надалі авторами було прийнято рішення для забезпечення точного і плавного керування рухом автоматичного транспортного засобу-шатла використовуються ПІД-регулятори (рис. 3), що дають змогу регулювати швидкість і переміщення та додають в такі системи елементи інтелектуалізації в керуванні.

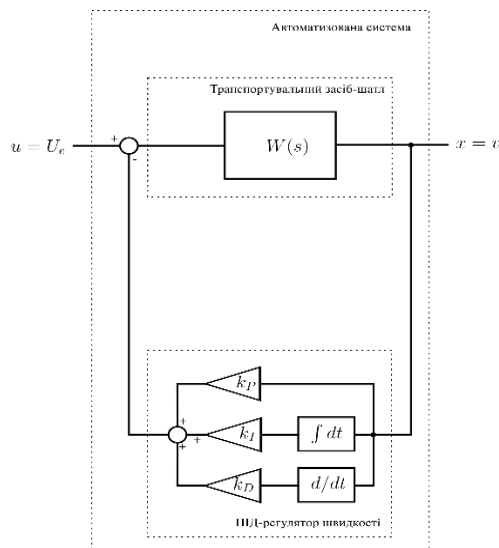


Рис. 3 Структурна схема автоматизованої системи транспортувального засоба-шатла із автоматичним ПІД-регулятором швидкості

ПІД-регулятори дають змогу точно регулювати швидкість руху шатла, забезпечується точний контроль переміщення шатла до заданої позиції. Це зумовлює нові завдання, яким є оптимальне налаштування параметрів ПІД-регуляторів.

Важливим завданням є налаштування параметрів ПІД-регуляторів для досягнення оптимальних характеристик керування. Для автоматичного транспортного засоба-шатла необхідно забезпечити мінімальні відхилення від бажаної швидкості під час перевезення вантажів.

Для досягнення цієї мети параметри ПІД-регулятора мають бути налаштовані таким чином, щоб компенсувати вплив зовнішніх впливів, таких як сили тертя і зміни навантаження. Необхідно забезпечити мінімальні відхилення від бажаної швидкості під час перевезення вантажів. Параметри ПІД-регулятора мають бути налаштовані таким чином, щоб компенсувати вплив зовнішніх впливів, таких як сили тертя і зміни навантаження.

Вибір параметрів ПІД-регуляторів здійснюється за допомогою комп'ютерного моделювання з урахуванням умов стійкості. Умови стійкості, отримані з використанням критерію Рауса і критерію Гурвіца, визначають допустимі значення параметрів, що гарантують стабільну роботу системи, а комп'ютерне моделювання дає змогу перевірити роботу системи з різними налаштуваннями, не піддаючи ризику реальне

обладнання.

Експериментальні дослідження та створений випробувальний стенд можуть бути використані для розроблення практичних рекомендацій щодо налаштування ПІД-регуляторів. На рис. 4 – Структурні схеми автоматизованої системи роботизованого транспортувального засоба-шатла із автоматичним ПІД-регулятором комбінованим лінійним (а) та автоматичним ПІД-регулятором комбінованим нелінійним (б)

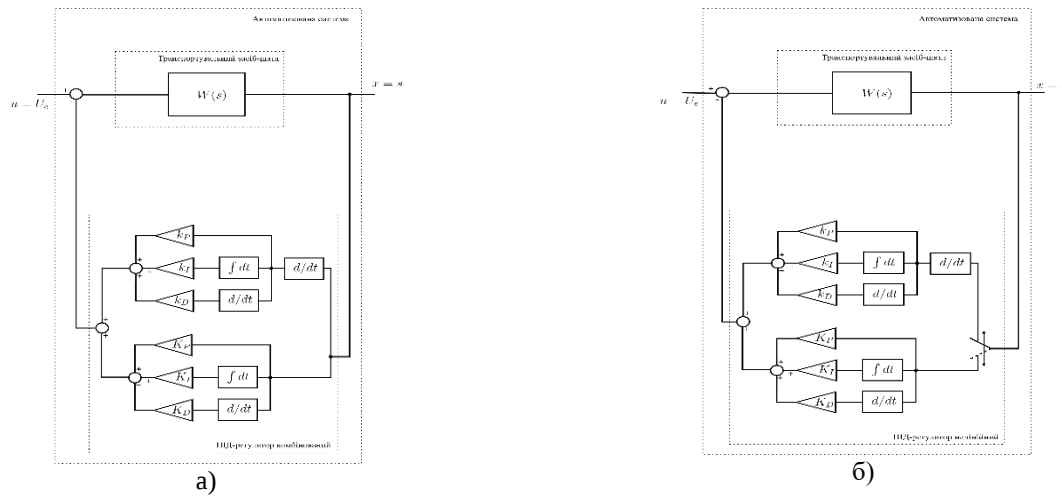


Рис. 4 – Структурні схеми автоматизованої системи роботизованого транспортувального засоба-шатла із автоматичним ПІД-регулятором комбінованим лінійним (а) та автоматичним ПІД-регулятором комбінованим нелінійним (б)

У дослідженні, розроблено математичні моделі систем управління, що базуються на ПІД-регуляторах. Ці моделі представлено у вигляді лінійних диференціальних рівнянь третього та четвертого порядків. На основі запропонованих математичних моделей досліджено амплітудно-частотні характеристики процесів керування та показано можливість виникнення резонансних режимів.

Отримано умови, яким мають задовольняти параметри конструкцій і ПІД-регуляторів шатла для запобігання резонансних процесів:

Функція (6) представляє собою поліном восьмого ступеня:

$$\begin{aligned} \varphi(\omega) = & a_2^2 \omega^8 + (a_1^2 - 2a_2(a_0 + K_D)) \omega^6 + (a_0 + K_D + 2(a_2 K_I - a_1 K_P)) \omega^4 + \\ & + (K_P^2 - 2(a_0 + K_D) K_I) \omega^2 + K_I^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Щоб визначити стаціонарні точки функції (6), використаємо її похідну:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{d\omega}(\omega) = & 8a_2^2 \omega^7 + 6(a_1^2 - 2a_2(a_0 + K_D)) \omega^5 + \\ & + 4(a_0 + K_D + 2(a_2 K_I - a_1 K_P)) \omega^3 + 2(K_P^2 - 2(a_0 + K_D) K_I) \omega. \end{aligned} \quad (7)$$

Стаціонарні точки (6) визначаються рівністю нулю першої похідної (7):

$$\omega = 0, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} 4a_2^2 \omega^6 + 3(a_1^2 - 2a_2(a_0 + K_D)) \omega^4 + 2(a_0 + K_D + 2(a_2 K_I - a_1 K_P)) \omega^2 + \\ + (K_P^2 - 2(a_0 + K_D) K_I) = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Як свідчить рівняння (9) у випадку дійсного кореня ω^2 матимемо три резонансних частоти, тому для уникнення таких явищ слід задовольнити:

$$\text{Im}(\omega^2) \neq 0, \quad (10)$$

де ω^2 – корінь рівняння (9).

Таким чином, маємо можливість сформулювати визначення параметрів ПІД-регулятора для автоматичного керування переміщенням, якому будуть притаманні додаткові можливості щодо уникнення

резонансних явищ.

Наступними проблемами, що прагнули вирішити автори була інтеграція інтелектуальних систем управління:

- обмеження традиційних систем: традиційні системи управління, засновані на ПІД-регуляторах, мають свої обмеження, особливо в складних динамічних середовищах;
- необхідність адаптації: для розв'язання цієї проблеми необхідно інтегрувати інтелектуальні системи керування, здатні адаптуватися до мінливих умов;
- оптимізація роботи: інтелектуальні системи дозволяють оптимізувати роботу системи в цілому, враховуючи множину факторів.

Для розв'язання цієї проблеми необхідно інтегрувати інтелектуальні системи в керування, здатні адаптуватися до мінливих умов і оптимізувати роботу системи в цілому. Інтеграція інтелектуальних систем керування дає змогу враховувати безліч чинників, таких як: поточний стан складської системи; наявність перешкод на маршруті; розподіл завдань між роботами-шатлами.

Одним із підходів до інтеграції інтелектуальних систем є непряме керування шатлами через зміну параметрів бортових ПІД-регуляторів. Цей підхід поєднує переваги як ПІД-регуляторів, так і інтелектуальних систем. ПІД-регулятори забезпечують швидке і точне керування рухом, а інтелектуальна система відповідає за вибір оптимальних параметрів регулятора залежно від поточної ситуації.

Висновки.

Одним із важливих аспектів автоматичного керування роботизованими шатловими системами для внутрішньоскладської логістики є оптимізація швидкості руху шатла для мінімізації енергоспоживання. Витрати енергії на транспортування вантажів залежать від швидкості руху шатла, його маси та пройденої відстані. Запропоновано використання ПІД-регуляторів для підтримання значення заданих величин автоматичного керування. Використання таких підходів дозволяє аналізувати поточне завантаження системи, маршрути та обирати оптимальну швидкість руху, забезпечуючи баланс між швидкістю виконання операцій та енергоспоживанням.

Швидкість руху автоматичних транспортувальних засобів-шатлів визначається пропускнуною 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.

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.

Автори висловлюють подяку за всебічну підтримку доктору технічних наук, професору Ігорю Шакировичу Невлюдову –Заслуженому діячу науки і техніки України, Лауреату Державної премії в галузі науки і техніки України; Лауреату Державної премії України в галузі освіти, завідувачу кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, ХНУРЕ; колективу Студентського конструкторсько-технологічного бюро «Робототехніка та мехатроніка» кпфедри КІТАР, ХНУРЕ; компаніям CAPELOU Europe GmbH (Німеччина), ТОВ «КАПЕЛОУ» (Україна, м. Київ) та ТОВ «Омега» (Україна, м. Харків).

Список літератури:

1. 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/202>
2. 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.
3. Вжесневський М., Чала О. Автоматизація внутрішнь-складських виробничих логістичних процесів для впровадження концепції Industry 4.0: енергоощадливість, продуктивність, мобільність, модульність, автономність // Системи управління, навігації та зв'язку : зб. наук. пр. – 2024. – № 2(76). – С. 34–38.
4. Conveyor Line Development Features for Pharmaceutical Products Industrial Logistics / I. Nevliudov, V. Yevsieiev, S. Maksymova, O. Klymenko // Decision support systems in project and program management : Collective monograph edited by I. Linde. European University Press. Riga : ISMA, 2024. - P. 152-174
5. Vizir, Y., & et al. (2024). Lighting Control Module Software Development. Journal of Universal Science Research, 2(2), 29–42
6. A Small-Sized Robot Prototype Development Using 3D Printing / I. Nevliudov, V. Yevsieiev, S. Maksymova, O. Chala // CAD In Machinery Design Implementation and Educational Issues (CADMD'2023) : proceedings of the XXXI International Conference. (Conference in memory of Professor Jerry Wrobel), Suprasl, 26-28 October, 2023. – Suprasl, 2023. – P. 12.
7. Nevliudov, A. Bronnikov, O. Chala and R. Allakhveranov, "Improvement and Optimization of Automated Logistics Processes in Logistics Premises," 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2023, pp. 1, doi: 10.1109/MEES61502.2023.10402386.
8. 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>

9. Гіль, А., Чала, О., Филипенко, О. (2021). Промислові інтерфейси та протоколи передачі даних інтегрованих систем для автоматизованого управління в умовах Industry 4.0. Виробництво & Мехатронні Системи 2021: матеріали V-ї Міжнародної конференції, Харків, 127-30
10. A. Perekrest, I. Konokh and M. Kushch-Zhyrko, "Administrative Buildings Heating Automatic Control Based on Maximum Efficiency Criterion," 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2019, pp. 202-205, doi: 10.1109/MEES.2019.8896517.
11. Alyokhina S., Nevliudov I., Romashov Y. Safe Transportation of Nuclear Fuel Assemblies by Means of Wheeled Robotic Platforms // Nuclear and radiation safety.– 3(91). – 2021. – p. 43-50. DOI:10.32918/nrs.2021.3(91).05

References (transliterated)

1. 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/202>
2. Nevliudov, I., Vzhesnievskyi, M., Romashov, Y. i Chala, O. (2023) Matematychni modeliuvannya mekhatronnykh shatliv yak ob'ektiv avtomatyzatsii dlia bahatorivnyvykh system vnutrishnoskladskoi lohistyky [Mathematical modeling of mechatronic shuttles as an objective of automation for complex intra-warehouse logistics systems], Suchasnyi stan naukovykh doslidzhen ta tekhnolohii v promyslovosti, (4 (26), c. 135–144. doi: 10.30837/ITSSI.2023.26.135 [in Ukrainian]
3. Vzhesnievskyi, M., & Chala, O. (2024). Avtomatyzatsiia vnutrishno-skladskykh vyrobnychykh lohistychnykh protsesiv dlia vprovadzhennia kontseptsii Industry 4.0: enerhooschadlyvist, produktyvnist, mobilnist, modulnist, avtonomnist. Systemy upravlinnia, navihratsii ta zviazku: Zbirnyk naukovykh prats, (2[76]), 34–38.
4. Conveyor Line Development Features for Pharmaceutical Products Industrial Logistics / I. Nevliudov, V. Yevsieiev, S. Maksymova, O. Klymenko // Decision support systems in project and program management : Collective monograph edited by I. Linde. European University Press. Riga : ISMA, 2024. - P. 152-174
5. Vizir, Y., & et al. (2024). Lighting Control Module Software Development. Journal of Universal Science Research, 2(2), 29–42
6. A Small-Sized Robot Prototype Development Using 3D Printing / I. Nevliudov, V. Yevsieiev, S. Maksymova, O. Chala // CAD In Machinery Design Implementation and Educational Issues (CADMD'2023) : proceedings of the XXXI International Conference. (Conference in memory of Professor Jerry Wrobel), Suprasl, 26-28 October, 2023. – Suprasl, 2023. – P. <https://doi.org/10.30837/MMP.2024.152>
7. Nevliudov, A. Bronnikov, O. Chala and R. Allakhveranov, "Improvement and Optimization of Automated Logistics Processes in Logistics Premises," 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/MEES61502.2023.10402386.
8. 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>
9. Hil, A., Chala, O., Fylypenko, O. (2021). Promyslovi interfeisy ta protokoly peredachi danykh intehrovanykh system dlia avtomatyzovanoho upravlinnia v umovakh Industry 4.0. Vyrobnystvo & Mekhatronni Systemy 2021: materialy V-oi Mizhnarodnoi konferentsii, Kharkiv, 127-30 [in Ukrainian].
10. A. Perekrest, I. Konokh and M. Kushch-Zhyrko, "Administrative Buildings Heating Automatic Control Based on Maximum Efficiency Criterion," 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2019, pp. 202-205, doi: 10.1109/MEES.2019.8896517.
11. Alyokhina S., Nevliudov I., Romashov Y. Safe Transportation of Nuclear Fuel Assemblies by Means of Wheeled Robotic Platforms // Nuclear and radiation safety.– 3(91). – 2021. – p. 43-50. DOI:10.32918/nrs.2021.3(91).05

Надійшла (received) 02.02.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Максим Вжеснівський (Maksym Vzhesnievskyi) – здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за освітньо-науковою програмою «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТДФ) кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7585-628X>, e-mail: maksym.vzhesnievskyi@nure.ua.

Олена Чала (Olena Chala) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-2454-3774, , e-mail: olena.chala@nure.ua .