

М. О. Вжеснєвський, О. О. Чала

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

АВТОМАТИЗАЦІЯ ВНУТРІШНЬО-СКЛАДСЬКИХ ВИРОБНИЧИХ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ INDUSTRY 4.0: ЕНЕРГООЩАДЛИВІСТЬ, ПРОДУКТИВНІСТЬ, МОБІЛЬНІСТЬ, МОДУЛЬНІСТЬ, АВТОНОМНІСТЬ

Анотація. У статті розглянуто основні тенденції та завдання, що ставлять перед собою топові фірми основним профілем роботи яких є розробка, впровадження та підтримка систем внутрішньоскладської логістики. Основними критеріями на які в найближчому майбутньому будуть направлені розробки в сфері автоматизації виробничої внутрішньої логістики є енергоощадливість, продуктивність, мобільність та автономність. Доведено, що одним із основних шляхів удосконалення виробничих внутрішньоскладських логістичних процесів є шатлові системи, що можуть бути модернізовані, шляхом використання концепції кіберфізичних підходів. Це є один з найкоротших шляхів підвищення параметрів зменшення часу транспортування, сортування, зберігання та підвищення продуктивності, енергоефективності та гнучкості процесів виробничої внутрішньоскладської логістики.

Ключові слова: автоматизація, виробництво, внутрішньоскладська логістика, INDUSTRY 4.0, автономність, енергоощадність, модульність.

Вступ

Останні роки видався непростим сфери логістики України, на ринку все ще залишаються топові гравці, які, не дивлячись на всі негаразди, обслуговують клієнтів та допомагають їм підтримувати бізнес та успішно розвиватися [1]. Якість обслуговування визначається багатьма факторами, першочергові з яких – вчасне отримання та відповідність замовленню. 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 [2]. 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 проекту на основі модульності обладнання.

Однією з основних умов, що забезпечує високі темпи зростання продуктивності праці в промисловості, є постійне вдосконалення парку технологічного обладнання. Це досягається насамперед заміною застарілого обладнання новим, сучасним [3].

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 новітні перспективні підходи/ Актуальністю поведених досліджень визначається необхідністю забезпечення підвищення ефективності чинного парку обладнання, з невеликими витратами і швидкою окупністю для вирішенні ряду питань виробничої внутрішньоскладської логістики.

Метою статті є обґрунтування вибору оптимальних критеріїв модернізації та підвищення якості виробничої внутрішньоскладської логістики, за ра-

хунок використання автоматизованих модулів для підвищення продуктивності та мобільності та модульності, зниження енерговитрат в системах автоматизації виробничої складської логістики. **Об'єктом дослідження** є процеси модернізації в виробничих внутрішньоскладських автоматизованих системах на основі концепції кіберфізичних підходів INDUSTRY 4.0, а предметом – шляхи підвищення їх продуктивності за критеріями енергоощадливості та мобільності, автономності та модульності.

Основна частина

Якщо говорити про позитивні зрушення в українській логістиці, можна відмітити 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 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 відбиток вуглецю, забруднення та відходи на всіх етапах ланцюга поставок [4].

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 [5]. Для аналізу було використано використали «Портал відкритих даних від Міністерства цифрової трансформації України» [6]. З поведеного аналізу видно, що логістичні компанії підвищують свій капітал, розвиваються. Провівши аналіз було виділено ряд компаній, які займаються автоматизацією логістики прослідковано тенденції розвитку. Основними завданнями, що перед собою ставить група компаній KAPELOU, виробник роботизованого обладнання та постачальник комплексних рішень для складу є [7]:

- 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;
- встановлення обладнання, яке в разі потреби можна швидко релокувати та використовувати на іншому складі.

Необхідно також виділити компанію «SBRobotics» [8]. 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 покращити ефективність 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. Основні напрямки роботи:

- інтеграція та сумісність: розробка робототехнічних рішень з урахуванням сумісності та 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 робототехнічними рішеннями;
- безпека та регуляторні питання: питання безпеки та відповідності регуляторним вимогам, дотримання стандартів безпеки та рішень, які відповідають найвищим нормам і вимогам.

Компанія вбачає перспективу у використанні передових технологій на основі нововведень належ в роботизації, за рахунок використання ролаштабелер - підйомно-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» [9] – 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, пластикувані тару, сміттєві контейнери. Компанія вирішує комплекс завдань: впроваджувати функціональні ідеї, ефективно використовуючи площу замовника. Пропонує варіанти і комбінації, щоб в результаті вийшов максимально опрацьований проєкт 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 робомашин [10]. 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 складових частин з використанням кібефізичних підходів Industry 4.0. Таким чином, основним об'єктом логістики є матеріальні потоки та способи реалізації їх переміщення [11].

Використання багаторівневих шатлових систем частково вирішує проблему транспортування та зберігання великих об'ємів продукції на складах [12]. Але значним недоліком відзначити високу вартість шатлових конструкцій та їх монтажу, обслуговування та невисоку енергоефективність [10].

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 [13].

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 [14];

– Autonomous Vehicle Storage and Retrieval System (AS/RS) – використання автоматизованих керованих підіймно-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.

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. Всі вони переслідують мету оптимізації визначених параметрів складування, при цьому є можливість знехтувати іншими. Це, відповідно, не дозволяє виділити якусь універсальну стратегію зберігання виробів. Сучасні системи WMS базуються на впровадженні автоматизованих робототехнічних складів із хаотичним зберіганням високої щільності.

Сучасним трендом в автоматизації складських приміщень є використання шатлових систем для обслуговування виробничих складів та підготовчої зони складу. Традиційно шатли, як правило, реалізуються з волоочильними кабелями. З погляду гнучкості й можливості пересування на складі й виробництві це викликає певні проблеми, що можуть бути вирішені за рахунок використання автономних шатлів. До сімейства шатлів належать каналні транспортні засоби й автоматичні розподільні транспортні засоби. Один із можливих прикладів конструктивного оформлення автономного шатла для забезпечення внутрішньоскладського транспортування вантажів проміж рядами стелажів показаний на рис. 1. В цьому прикладі бачимо автономний транспортувальний шатл у вигляді електромеханічної чотириколісної платформи (рис. 1) із розташуванням пари рушійних коліс з одного краю, а пари підтримуючих коліс – відповідно на протилежному краю, та з центральним розташуванням майданчику для транспортованого вантажу проміж осями коліс. В таких автономних 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.

Компоновка автономного транспортувального шатлу із центральним розташуванням вантажу дозволяє оформити автоматизовані електроприводи рушійних коліс у вигляді досить компактного вуз-

лів, що розташовані по краям човника. При цьому, за рахунок спеціальної висувної системи (рис. 2.) можна забезпечувати розвантаження транспортваного вантажу у двох напрямках, що дозволить обслуговувати два ряди стелажів одним таким шатлом.



Рис. 1. Загальний вигляд автономного човника (шатла) для внутрішньоскладського транспортування проміж рядами стелажів, запропонованого фірмою Kapelou

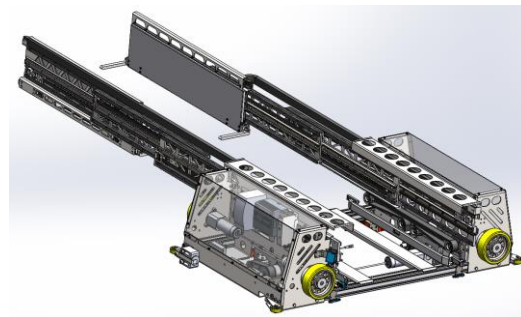


Рисунок 2 – Внутрішня будова автономного човника (шатла) для внутрішньоскладського транспортування проміж рядами стелажів, запропонованого фірмою Kapelou

Передбачається, що запропонований транспортувальний шатл буде рухатись по спеціальному металевим напрямним, які заздалегідь встановлені проміж двома рядами стелажів на відповідному рівні.

Забезпечення повної автономності таких транспортувальних шатлів є принциповою на відміну від іншого складського устаткування, 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 внаслідок цього дозволить також зменшити довжину транспортувальних шляхів, що, зрозуміло, буде надавати переваг системі внутрішньоскладського транспортування в цілому. Досить важливим питанням є вибір типу електричних двигунів для мотор-коліс автономного транспортувального шатлу, який 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 спеціальних задач автоматизації транспортувального човника потребує належного врахування притаманних шатлу властивостей, що можна забезпечити за рахунок використання відповідних математичних моделей процесів, що відбуваються у човнику на різних режи-

мах експлуатації. В якості окремих досліджуваних питань щодо транспортувального шатлу розглядати- мемо далі низку питань, які пов'язані із забезпеченням горизонтального переміщення вантажу.

Відповідно прийнятій схематизації (рис. 3, а) прямолінійний рух шатлу уздовж напрямних між радами стелажів забезпечується при обертанні коліс, на які він спирається. Отже, завдяки такому припущенню маємо, що прямолінійна координата транспортувального шатлу та кут повороту його коліс зв'язані співвідношенням такого вигляду:

$$\dot{s} = r_w \cdot \dot{\varphi}, \quad (1)$$

де r_w – радіус коліс човника, φ – кут повороту коліс транспортувального човника.

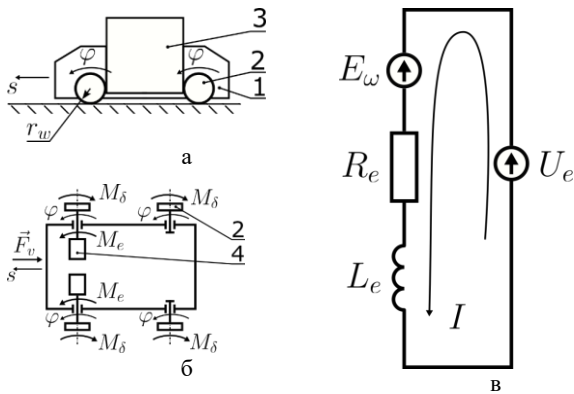


Рис. 3. Загальна (а), кінематична (б) та еквівалентна електрична схеми електродвигунів (в) шатлу: 1 – човник; 2 – колесо; 3 – вантаж; 4 – електричний двигун

В прийнятій кінематичній схемі (рис. 3б) враховано наявність двох опорних коліс, а також й двох рушійних коліс, що виконані у вигляді мотор-колів із індивідуальними електричними двигунами.

Для належного відтворення властивостей транспортувального атоматизованого шатлу слід врахувати тертя кочення коліс (рис. 3, б) човника:

$$|M_\delta| \leq M_\delta^{\max}; \quad M_\delta^{\max} \approx mg\delta/4, \quad (2)$$

де M_δ та M_δ^{\max} – момент тертя кочення колеса та його граничне значення, відповідне зрушенню колеса; m – повна маса човнику та δ – коефіцієнт тертя кочення коліс.

Врахування моменту тертя кочення коліс (2) є важливим для належної оцінки руху шатла на різних режимах, але його врахування призводить до суттєвої

нелінійності. Прийнята схематизація (рис. 3) транспортувального шатлу та сформульовані тут припущення щодо факторів, які дозволяють виконати дослідження процесів, що відбуваються при прямолінійному русі автономного атоматизованого шатлу, яким забезпечується функція горизонтального переміщення вантажів. Шатли з електричним приводом зазвичай з'єднані з носієм за допомогою волочилного кабелю. Тільки в новітніх розробках проектується автономні шатли. Можливим її рішенням є модернізація обладнання за допомогою синтезу технологій ПоТ і сучасних сенсорів з використанням кіберфізичних підходів INDUSTRY 4.0. Логістичні шатли застосовують на складах із високим ступенем автоматизації. За рахунок використання сучасного програмного забезпечення стає можливою повністю автономна робота шатлів, які без участі оператора переміщують вантаж в потрібні комірки.

Завдяки автономному режиму шатлів забезпечується максимальна ефективність роботи складу. Зокрема, використання шатлових систем дозволяє знизити навантаження на наявний персонал – для обслуговування одного стелажного масиву вистачає одного оператора. При цьому швидкість обробки надходжень на склад і набору замовлень не знижується. Автономне керування атоматизованим шатлом має забезпечувати стабільність заданих умов, а також плавний перехід від одного стану до іншого усталеного стану. Основною перешкодою стабільності станів є різноманітні неконтрольовані випадкові збурення різного походження, що впливають на транспортувальний шатл.

Забезпеченню саме заданих станів істотно перешкоджають також невизначені заздалегідь умови експлуатації, у першу чергу змінна маса транспортованого вантажу, яка може бути будь-якою в межах максимально допустимого значення. Розроблені математичні моделі дозволяють досліджувати процеси в атоматизованому автономному транспортувальному шатлі як в електромеханічній системі, але для розв'язування інженерних задач щодо атоматизації ці моделі мають бути відповідним чином тотожно перетворені. Саме на це будуть направлені наступні дослідження та експерименти. На даному етапі було проведено модернізацію з врахуванням одержаних математичних моделей та рішень та проведено випробування в виробничих умовах.

У табл. 1 наведено результати виробничих експериментів і середньостатистичні параметри стелажно-шатлових систем до модернізації та після .

Таблиця 1 – Технічні характеристики шатлових систем

Характеристика	Значення параметру до модернізації	Значення параметру після модернізації
Висота стелажу, мм	12000	14 000
Вантажопідйомність кран-штабелера, кг	6500	8500
Кут нахилу рольганга,	3	5
Максимальна маса коробки, кг	30	47
Максимальна довжина каналу, мм	30000	36000
Крок перестановки ярусів по висоті, мм	45	50
Температурний режим, °С	- 30 до +45	- 30 до +45
Максимальна швидкість, м/с	5	6

Можемо зробити висновки, що подібні системи підходять для роботи з будь-якими товарами, включаючи ті, які пред'являють підвищені вимоги до екологічності та гігієнічності обладнання – фармацевтичної і харчової продукції. Найкращих показників ефективності такі системи досягають при розміщенні на складах із високою завантаженістю й активним товарообігом. Таким чином, модернізуючи застаріле обладнання для виконання конкретних функцій шатлових систем, замінюючи окремі системи і агрегати обладнання, можна привести виробництво до сучасних стандартів Industry 4.0, в тому числі і з елементами кіберфізичних підходів, без величезних капітальних витрат.

Висновки

В статті представлено узагальнені результати аналізу компаній, що спеціалізуються на розробці,

впровадженні та обслуговуванні автоматизованих логістичних систем. Проведено обґрунтування вибору критеріїв модернізації та підвищення ефективності виробничої внутрішньоскладської логістики, за рахунок використання удосконалених автоматизованих модулів, з метою підвищення продуктивності та мобільності, зниження енерговитрат в системах автоматизації виробничої складської логістики. Основними критеріями, на які в найближчому майбутньому будуть направлені розробки в сфері автоматизації виробничої внутрішньої логістики є енергоощадливість, продуктивність, модульність, автономність. Тобто, автоматизація та удосконалення шатрових систем в логістиці, шляхом використання кіберфізичних підходів, один з найкоротших шляхів підвищення параметрів зменшення часу транспортування, сортування, зберігання та підвищення енергоефективності та гнучкості процесів внутрішньоскладської логістики.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ТОП-15 найбільших логістичних компаній України в 2023 році . Режим доступу: <https://wareteka.com.ua/uk/blog/logistichnih-kompanij-ukrayini-rejting/>
2. 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.
3. Nevludov, I., Vzhesnievskiy, 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.
4. Топ 7 трендів у логістиці 2023 року. . Режим доступу: <https://haski.ua/blog/logistic/logistychni-trendy-2023-roku>
5. Перша українська спеціалізована платформа для гравців ринку складської логістики. Заголовок з екрану. Режим доступу: <https://wareteka.com.ua/uk/blog/logistichnih-kompanij-ukrayini-rejting/>
6. Портал відкритих даних. Офіційний портал. Режим доступу: <https://data.gov.ua/>
7. KAPELOU. Наші проекти. Офіційна сторінка KAPELOU. Заголовок з екрану. Режим доступу: <https://kapelou.com/>
8. Запроваджуйте інновації з SBRobotics. Змінюймо майбутнє разом! Режим доступу: <https://sbrobotics.ua/>
9. Sklad servis/ Офіційна сторінка/ Заголовок з екрану. Режим доступу: <https://ssk.ua/ua>
10. 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
11. Nevludov Igor, Maksymova Svitlana, Chala Olena, Bronnikov Artem, & Vzhesnievskiy 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>
12. 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).
13. . 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>
14. 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>
15. Чала, О., Сливка, А. (2023) Рівні засобів ІІТ в інформаційних технологіях. Виробництво & Мехатронні Системи: матеріали VII Міжнародної конференції, Харків, С. 51-60.

Received (Надійшла) 12.01.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.04.2024

Automation of internal warehouse manufacturing logistics processes for the implementation of the industry 4.0 concept: energy saving, productivity, mobility, modularity, autonomy

M. Vzhesnievskiy, O. Chala

Abstract. The article examines the main trends and tasks faced by top companies whose main job profile is the development, implementation and support of internal warehouse logistics systems. In the near future development in the field of automation of production internal logistics will be directed on energy efficiency, productivity, mobility, modularity and autonomy. It has been proven that one of the main ways of improving production internal warehouse logistics processes is shuttle systems that can be modernized by using the concept of cyber-physical approaches. This is one of the shortest ways to increase the parameters of reducing the time of transportation, sorting, storage, and increasing the productivity, energy efficiency, and flexibility of production intra-warehouse logistics processes.

Keywords: automation, production, intra-warehouse logistics, INDUSTRY 4.0, autonomy, energy saving, modularity.