

DOI 10.36074/grail-of-science.18.07.2025.054

# ІНТЕГРАЦІЯ РЕГУЛЮЮЧИХ МЕХАНІЗМІВ У СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СКЛАДОМ (WMS/WCS): ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ

Федік Леся Юріївна

канд. техн. наук, доцент,

доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій  
Луцький національний технічний університет, Україна

**Анотація.** У статті досліджено еволюцію складської логістики в контексті переходу від традиційного ручного управління до високотехнологічних автоматизованих систем. Проаналізовано зростаючі вимоги сучасних логістичних операцій до швидкості, точності та економічності, що зумовлюють широке впровадження автоматизації. Описано функціональну взаємодію систем управління складом (WMS) та систем управління складським обладнанням (WCS), які формують ієрархічну архітектуру управління роботизованим складом. Акцентовано увагу на перевагах інтеграції: підвищенні продуктивності, точності, зниженні витрат та покращенні простежуваності логістичних потоків. Висвітлено регулюючі механізми, які забезпечують координацію між рівнями системи, та визначено ключові протоколи і стандарти, що сприяють ефективному обміну даними.

**Ключові слова:** складська логістика, автоматизовані системи, WMS, WCS, ієрархічна архітектура, регулюючі механізми, управління ресурсами, продуктивність, простежуваність, промислові протоколи, робототехніка, складські інформаційні системи, інтеграція систем, автоматизація складу.

**Постановка проблеми.** Сучасні логістичні операції зіштовхуються з дедалі зростаючими вимогами до швидкості, точності та економічності. Відповіддю на ці виклики стало широке впровадження автоматизації та роботизації, основою якої є ефективне управління інформаційними та фізичними потоками. У цьому контексті системи управління складом (WMS) та системи управління складським обладнанням (WCS) відіграють центральну роль, трансформуючи склади з простих сховищ на високотехнологічні операційні центри [1; 2].

Однак успішна реалізація автоматизованих логістичних процесів залежить не лише від наявності відповідного обладнання, а й від рівня узгодженості регулюючих механізмів, які забезпечують ефективну взаємодію між різнорівневими компонентами системи – WMS, WCS та виконавчими пристроями. Недостатня інтеграція цих механізмів призводить до збоїв, втрати продуктивності та обмеженої гнучкості системи.



**Аналіз досліджень і публікацій.** У 2020 році дослідники Baker P. та Halim Z. здійснили ґрунтовний аналіз еволюції систем управління складом (WMS), окресливши основні тренди інтеграції логістичних функцій та автоматизації внутрішніх процесів. У своїй роботі вони акцентували на зростаючому значенні регулюючих механізмів, які дозволяють WMS-системам не лише управляти запасами, а й координувати дії виконавчих елементів через WCS-компоненти [3].

У 2023 році науковці Yang T., Li X. та Wang H. дослідили особливості інтеграції SCADA-систем та програмованих логічних контролерів (PLC) до складу WCS. Автори запропонували адаптивну архітектуру регулювання, що базується на зворотному зв'язку в реальному часі, і дозволяє гнучко керувати виконавчими механізмами у складських умовах [4].

Своєю чергою, Sioud R., Barmoumen M. та Hamani N. у 2025 році презентували математичну модель оптимального розподілу завдань між мобільними роботами. У рамках моделі розглядалися механізми регулювання завантаження агентів, адаптація маршрутизації та балансування черг – ключові аспекти інтеграції WCS з виконавчим рівнем [5].

У 2024 році Zhao Y., Chen Q. та Huang J. підняли питання безпеки передачі даних між WMS та WCS. У своїй статті вони запропонували модель кіберзахисту для промислових мереж на базі OPC UA, яка включає механізми шифрування, автентифікації та контролю доступу до регулюючих інтерфейсів [6].

Актуальні аспекти практичного впровадження інтеграції регулюючих механізмів було також розглянуто в дослідженні Suleiman L., Al-Dmour R. та Ayub M. (2022), де йдеться про виклики у забезпеченні сумісності між WMS, WCS та робототехнікою. Автори аналізують обмеження промислових протоколів, вплив типу обладнання на стабільність комунікації та важливість middleware у процесі трансляції команд [7].

Загалом наукові публікації останніх років демонструють зростаючий інтерес до регулюючих механізмів як центрального елемента ефективної автоматизації складів. Науковці акцентують на необхідності інтеграції інтелектуальних алгоритмів, адаптивних протоколів та захищених архітектур управління для досягнення високої продуктивності, гнучкості та безпеки логістичних процесів.

**Мета роботи.** Метою даного дослідження є аналіз еволюції складської логістики в умовах цифрової трансформації, а також обґрунтування принципів побудови багаторівневої архітектури управління автоматизованими складськими системами на основі інтеграції WMS, WCS і виконавчих пристроїв. Робота спрямована на визначення ключових функціональних компонентів, регулюючих механізмів і протоколів взаємодії, що забезпечують ефективність, продуктивність та гнучкість сучасної роботизованої складської інфраструктури.

**Виклад основного матеріалу.** WMS являє собою програмне забезпечення високого рівня, що оптимізує весь процес складського зберігання, від надходження товару до його відвантаження. Завдяки йому здійснюється управління запасами, планування розміщення товарів, оптимізація маршрутів збору замовлень, контроль інвентаризацію та забезпечення повної простежуваності товарних потоків. Фактично, WMS приймає стратегічні та тактичні рішення, визначаючи «що» і «коли» потрібно зробити на складі [3].

На відміну від WMS, WCS є системою нижчого рівня, яка безпосередньо взаємодіє з автоматизованим обладнанням – конвеєрами, сортувальниками, автоматизованими системами зберігання та пошуку (AS/RS), а також автономними мобільними роботами (AMR). WCS отримує завдання від WMS і перетворює їх на операційні команди, контролюючи виконання цих команд у реальному часі. Вона забезпечує злагоджену роботу всіх компонентів автоматизованого складу, виступаючи своєрідним "диригентом" для обладнання [8].

Еволюція складської логістики від ручного управління до автоматизованих систем зумовлена цілою низкою факторів, що спричинили потребу у трансформації традиційних підходів до організації складських процесів. Зокрема, ключовими детермінантами стали необхідність підвищення продуктивності, тобто здатності обробляти більші обсяги замовлень із меншими часовими затратами, а також зниження операційних витрат шляхом оптимізації використання складських площ, енергетичних ресурсів і персоналу. Водночас автоматизація дозволяє значно підвищити точність операцій, зменшуючи кількість помилок під час зберігання, переміщення та комплектації товарів. Ще одним визначальним чинником стала потреба у забезпеченні повної простежуваності логістичних потоків – від моменту надходження товару на склад до його відвантаження – що реалізується за допомогою цифрових інструментів контролю та аналітики [2; 3].

У сучасному високотехнологічному складі системи управління складом (WMS) та системи контролю обладнання (WCS) формують багаторівневу ієрархічну архітектуру управління. WMS виконує функцію стратегічного планування, визначаючи загальний напрям роботи складу, тоді як WCS, інтегруючи комплексні регулюючі механізми, транслює ці директиви у конкретні команди для виконавчих пристроїв. Така узгоджена взаємодія дозволяє досягти високої точності та ефективності виконання операцій, забезпечуючи надійну координацію між усіма компонентами автоматизованого логістичного комплексу [8].

У традиційній автоматизації, регулюючі механізми часто асоціюються з класичними ПІД-регуляторами або системами керування двигунами. Однак у контексті роботизованих складів та взаємодії з WMS/WCS, поняття «регулюючих механізмів» значно ширше. Воно охоплює складні алгоритми, програмну логіку та протоколи, що забезпечують динамічне планування, координацію та оптимізацію роботи автономних роботів та іншого автоматизованого обладнання [9].

Ці механізми є мостом між високорівневими директивами WMS і низькорівневими командами виконавчих пристроїв [11].

Одним із ключових елементів регулюючих механізмів у складі є алгоритми оптимізації маршрутів і переміщень, які забезпечують ефективну навігацію автономних мобільних роботів (AMR) між зонами забору та вивантаження товарів. Їхнє основне призначення полягає у виборі найкоротших, найшвидших або найенергоєфективніших шляхів з урахуванням поточних умов роботи складу. Застосування спеціалізованих алгоритмів пошуку шляху, таких як A\* чи Dijkstra, а також методів зонального сканування з урахуванням

динамічних перешкод і руху інших агентів, дозволяє адаптувати маршрути в режимі реального часу. Це є критично важливим для мінімізації тривалості виконання завдань та забезпечення високої пропускної спроможності логістичного середовища, що прямо впливає на продуктивність усієї системи [10; 12].

Системи запобігання зіткненням та управління трафіком є критично важливими компонентами сучасних роботизованих складських комплексів, оскільки вони забезпечують безпечну взаємодію між автономними мобільними роботами, людьми та статичними об'єктами. Основне призначення таких систем полягає у запобіганні зіткненням, а також у динамічному регулюванні руху для уникнення заторів у багатокомпонентному середовищі. Для реалізації цих функцій використовуються різноманітні сенсорні технології, зокрема LiDAR, камери та ультразвукові датчики, які дозволяють роботам виявляти перешкоди та адаптувати траєкторії руху в режимі реального часу. Крім того, застосовуються алгоритми планування траєкторій у багатоагентних системах, що враховують пріоритети завдань, зони блокування та прогнозування конфліктних ситуацій. Такий підхід дозволяє забезпечити безперервність операцій, знизити ризики аварій та підвищити загальну ефективність логістичних процесів [13; 14].

Логіка розподілу завдань та балансування навантаження є фундаментальним елементом ефективного функціонування багатокомпонентних роботизованих систем у складській логістиці. Її основне призначення полягає в оптимальному призначенні завдань доступним роботам з урахуванням їхнього поточного місцезнаходження, рівня заряду батареї, технічної спеціалізації та ступеня завантаженості. Такий підхід дозволяє забезпечити рівномірне використання ресурсів, уникнути простоїв і підвищити загальну продуктивність системи. Для реалізації цих функцій застосовуються алгоритми балансування черги завдань, які динамічно адаптуються до змін у середовищі, а також механізми перепризначення завдань у випадку збоїв або зміни пріоритетів. Це дозволяє системі зберігати гнучкість і стабільність навіть в умовах високої інтенсивності операцій [15; 16].

Системи управління енергоспоживанням та зарядкою відіграють ключову роль у забезпеченні безперервної роботи автономних мобільних роботів (AMR) та іншого обладнання в умовах інтенсивного складського середовища. Їхнє основне призначення полягає у моніторингу рівня заряду батарей та автоматичному направленні роботів до зарядних станцій у найбільш оптимальний момент, що дозволяє мінімізувати простої та уникнути збоїв у виконанні логістичних операцій. Для реалізації цих функцій застосовуються алгоритми прогнозування заряду, які враховують поточне навантаження, історію споживання енергії та очікувану тривалість завдань. Крім того, планування «вікон» для зарядки дозволяє інтегрувати процес енергозабезпечення у загальну логіку управління завданнями, не порушуючи ритм роботи складу. Інтеграція з системами енергоменеджменту, зокрема Energy Management Systems (EMS), забезпечує балансування навантаження на електромережу, оптимізацію споживання енергії та зниження експлуатаційних витрат. Такий підхід дозволяє не лише підтримувати стабільну роботу обладнання, а й сприяє досягненню цілей сталого розвитку підприємства [17].

Механізми зворотного зв'язку та адаптації є ключовими елементами інтелектуального управління в роботизованих складських системах, оскільки вони забезпечують здатність системи реагувати на змінні умови та оптимізувати свою поведінку в реальному часі. Основне призначення таких механізмів полягає у зборі даних про виконання завдань, виявленні аномалій, а також у динамічному коригуванні параметрів управління на основі аналізу фактичних показників. Це дозволяє системі виявляти відхилення від очікуваних результатів, наприклад, затримки у виконанні завдань або зниження продуктивності окремих роботів, і відповідно адаптувати алгоритми керування. Застосування таких підходів включає моніторинг продуктивності роботів, порівняння планових і фактичних метрик, а також автоматичне налаштування регуляторів, зокрема PID-контролерів, для досягнення стабільної та ефективної роботи. Завдяки цьому система набуває властивостей самонавчання та самокорекції, що є критично важливим для забезпечення надійності та гнучкості в умовах змінного навантаження та складної логістичної динаміки [18].

Ці регулюючі механізми не працюють ізольовано, а є інтегрованою частиною WCS, яка, своєю чергою, отримує інформацію та директиви від WMS. Така ієрархія забезпечує як глобальну оптимізацію процесів, так і локальне ефективне управління кожним окремим роботизованим елементом.

Ефективна робота роботизованого складу залежить від безшовної та надійної інтеграції між усіма рівнями системи управління, формуючи чітку ієрархічну архітектуру. Ця архітектура зазвичай складається з трьох основних рівнів: WMS, WCS та Рівень Виконавчих Пристроїв (роботи/ПЛК) [19; 20].

Рівень WMS (Warehouse Management System) у багаторівневій архітектурі управління складом виконує функцію стратегічного та тактичного контролю над ключовими логістичними процесами. Він відповідає за планування операцій, управління запасами, прийом і обробку замовлень, організацію відвантажень, інвентаризацію та фінансову звітність. WMS забезпечує централізоване управління даними, інтегрується з корпоративними платформами та формує основу для прийняття рішень на рівні підприємства. Взаємодія WMS із нижчими рівнями, зокрема WCS, реалізується через передачу високорівневих завдань, які декомпонуються у конкретні команди для виконавчих пристроїв. Наприклад, WMS може сформулювати запит на переміщення певної кількості одиниць товару між зонами складу, не втручаючись у деталі маршруту чи технічну реалізацію – ці функції делегуються WCS. Таким чином, WMS задає загальну логіку роботи, визначаючи «що» і «коли» має бути виконано, залишаючи «як» – на розсуд системи контролю обладнання. Крім того, WMS зазвичай взаємодіє з ERP-системами (Enterprise Resource Planning), системами управління транспортом (TMS), CRM-платформами та іншими корпоративними додатками, що дозволяє забезпечити наскрізну інтеграцію логістичних процесів і досягти високого рівня прозорості та узгодженості даних [20; 21].

Рівень WCS (Warehouse Control System) у багаторівневій архітектурі управління складом виконує роль центрального інтелектуального модуля, який забезпечує координацію всіх автоматизованих елементів логістичної системи. Отримуючи високорівневі завдання від WMS, WCS декомпонує їх у деталізовані

команди, адаптовані до конкретного обладнання – роботів, конвеєрів, сортувальників тощо. Вона відповідає за оптимізацію маршрутів переміщення, управління чергами завдань, запобігання зіткненням між агентами та оперативне реагування на події в реальному часі. Саме на цьому рівні реалізуються ключові регулюючі механізми, що забезпечують ефективність і безперервність роботи автоматизованого складу.

У межах взаємодії WCS передає команди безпосередньо контролерам роботів, отримуючи зворотний зв'язок щодо стану виконання завдань, завершення операцій або виникнення помилок. Це дозволяє системі адаптувати поведінку обладнання відповідно до змін у середовищі та оперативно коригувати логіку управління.

З технічної точки зору, WCS має прямі інтерфейси з програмованими логічними контролерами (ПЛК), контролерами роботів, системами SCADA, сенсорними модулями та виконавчими механізмами. Така інтеграція забезпечується через промислові протоколи зв'язку, зокрема OPC UA, Modbus TCP/IP, EtherNet/IP, а також через спеціалізовані API виробників обладнання. Це дозволяє досягти високої швидкості обміну даними, надійності комунікації та масштабованості системи в умовах складної логістичної інфраструктури [22; 23].

Рівень виконавчих пристроїв у багаторівневій архітектурі управління складом відповідає за безпосереднє виконання фізичних операцій, що забезпечують переміщення, сортування, сканування та обробку товарів. До цього рівня належать автономні мобільні роботи (AMR), автоматизовані візки (AGV), роботи-маніпулятори, конвеєрні системи, сортувальники, сканери та різноманітні сенсорні пристрої. Всі ці компоненти отримують команди від системи WCS, реалізують їх у фізичному середовищі складу та надсилають зворотний зв'язок щодо стану виконання завдань, наявності помилок або завершення операцій. Така двостороння комунікація дозволяє WCS оперативно реагувати на зміни та адаптувати логіку управління.

З технічної точки зору, виконавчі пристрої зазвичай оснащені власними контролерами, які забезпечують взаємодію з WCS через промислові мережі та спеціалізовані протоколи зв'язку. Найпоширенішими серед них є Modbus TCP/IP, EtherNet/IP, Profinet, EtherCAT, а також OPC UA – протоколи, що забезпечують детерміновану передачу даних у реальному часі, високу надійність та масштабованість системи. Крім того, деякі пристрої використовують власні API або SDK, надані виробниками, що дозволяє гнучко інтегрувати обладнання у загальну логістичну інфраструктуру [24; 25].

Для забезпечення ефективної інтеграції та безперебійного обміну даними між рівнями управління складськими системами використовуються різноманітні протоколи та стандарти, що дозволяють досягти високої швидкості, надійності та масштабованості комунікації. Зокрема, для взаємодії між системою управління складом (WMS) та системою контролю обладнання (WCS) застосовуються веб-сервіси, такі як RESTful API та SOAP, які забезпечують гнучкий обмін структурованими даними, включаючи завдання, статуси виконання та звіти. Формати XML та JSON є поширеними стандартами для передачі інформації між системами, що дозволяє забезпечити сумісність та легкість обробки даних. У випадках, коли необхідна передача великих обсягів

інформації, наприклад пакетних замовлень, використовуються протоколи FTP або SFTP. Крім того, для асинхронного обміну повідомленнями між WMS і WCS, особливо в умовах високого навантаження, застосовуються системи черг повідомлень, такі як RabbitMQ та Apache Kafka, які дозволяють масштабувати обробку запитів і забезпечити стійкість до збоїв [26].

Для забезпечення ефективної взаємодії між системою контролю обладнання (WCS) та виконавчими пристроями – такими як програмовані логічні контролери (ПЛК), автономні мобільні роботи (AMR), сенсори та маніпулятори – застосовуються промислові протоколи зв'язку, що відповідають вимогам реального часу, безпеки та масштабованості. Серед них особливе місце займає OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) – сучасний міжплатформний протокол, який забезпечує уніфікований обмін даними в режимі реального часу, підтримує шифрування, автентифікацію та гнучку структуру інформаційної моделі. Для швидкої та детермінованої передачі даних між контролерами та обладнанням широко використовуються Profinet, EtherNet/IP та EtherCAT – протоколи, що забезпечують низьку затримку, високу пропускну здатність і надійність у складних виробничих умовах. Modbus TCP/IP, у свою чергу, залишається одним із найпоширеніших рішень завдяки простоті реалізації, відкритому стандарту та сумісності з великою кількістю пристроїв, особливо в системах з обмеженим бюджетом або у спадкових інсталяціях. Для обміну даними з сенсорів, моніторингу стану роботів та інтеграції IoT-пристроїв активно застосовується MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) – легковагий протокол, що підтримує асинхронну передачу повідомлень, низьке енергоспоживання та високу надійність у нестабільних мережах [20; 27].

Спеціалізовані API та SDK, що надаються виробниками роботів, є важливим інструментом для інтеграції обладнання у сторонні системи управління, зокрема WCS та ERP-платформи. Ці програмні інтерфейси дозволяють розробникам створювати адаптери, які транслюють завдання, отримані від системи управління складом, у команди, зрозумілі конкретному типу роботизованого пристрою. Завдяки API можлива двостороння комунікація: передача інструкцій до роботів і отримання зворотного зв'язку про статус виконання завдань, помилки або завершення операцій. SDK, у свою чергу, часто включає додаткові інструменти – симулятори, шаблони коду, редактори конфігурацій – що значно спрощують процес розробки та тестування інтеграційних рішень. Такий підхід дозволяє швидко масштабувати систему, уникати прив'язки до одного постачальника та забезпечити гнучкість у роботі з гетерогенними парками обладнання.

У складних інсталяціях автоматизованих складських систем проміжне програмне забезпечення (middleware) відіграє критично важливу роль як посередник між різними рівнями управління – зокрема між системою управління складом (WMS) та системою контролю обладнання (WCS), а також між WCS і виконавчими пристроями, такими як роботи, ПЛК або сенсори. Middleware забезпечує узгодженість і стабільність комунікації між компонентами, які можуть використовувати різні протоколи, формати даних або логіку обробки.

Однією з ключових функцій middleware є трансформація даних – тобто перетворення форматів повідомлень між системами, наприклад із XML у JSON

або з власного API у стандартний RESTful інтерфейс. Це дозволяє уникнути несумісності між платформами та забезпечити коректну інтерпретацію команд. Крім того, middleware виконує маршрутизацію повідомлень, направляючи їх до відповідних отримувачів залежно від типу завдання, пріоритету або статусу обладнання. Важливою функцією є також забезпечення безпеки – додавання рівнів автентифікації, шифрування та контролю доступу, що особливо актуально в умовах інтеграції з хмарними сервісами або зовнішніми ERP-системами. Нарешті, middleware відповідає за керування з'єднаннями, підтримуючи стабільність комунікації навіть у випадках тимчасових збоїв або перевантаження мережі, що дозволяє уникнути втрати даних і забезпечити безперервність операцій [25; 28-29].

Така багатошарова архітектура інтеграції з чітко визначеними інтерфейсами та протоколами є запорукою надійності, масштабованості та ефективності роботизованих складських комплексів, дозволяючи регулюючим механізмам виконувати свої функції безперебійно.

**Висновки.** У результаті дослідження було встановлено, що еволюція складської логістики є природною відповіддю на зростаючі потреби бізнесу в швидкості, точності та економічності операцій. Інтеграція систем управління складом (WMS) та систем управління обладнанням (WCS), а також виконавчих пристроїв, формує ефективну багаторівневу архітектуру, що забезпечує стабільну координацію, гнучкість та масштабованість логістичних процесів. Ключовим чинником успішної автоматизації є впровадження адаптивних регулюючих механізмів, протоколів реального часу, а також проміжного програмного забезпечення, здатного забезпечити сумісність між компонентами різної природи. Сучасні роботизовані склади, побудовані на цій основі, демонструють зростання продуктивності, зниження операційних витрат і покращення прозорості обробки замовлень.

**Пропозиції.** Для подальшої оптимізації роботизованих складських систем варто акцентувати увагу на впровадженні стандартизованих протоколів взаємодії, що забезпечують сумісність та гнучке масштабування програмно-апаратних рішень. Доцільним є розвиток проміжного програмного забезпечення (middleware) як платформи для трансляції, маршрутизації та захисту даних у складних багаторівневих системах. Модульний підхід до побудови архітектури дає змогу адаптувати інфраструктуру під конкретні умови експлуатації та знижує витрати на оновлення. Застосування алгоритмів машинного навчання відкриває нові можливості у прогнозуванні навантаження, адаптивному управлінні енергоспоживанням та маршрутизації, що підвищує ефективність регулюючих механізмів. Для забезпечення стабільної інтеграції важливо також здійснювати тестування інтерфейсів API робототехніки щодо сумісності з основними WCS/WMS-платформами, що дозволить уникати технологічних обмежень у розгортанні гетерогенних систем.

#### **Список використаних джерел:**

- [1] Журавський, О. Б., & Федік, Л. Ю. (2024). Застосування мехатронних систем під час виробництва медичного обладнання. *Grail of Science*, (35), 173-174. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.19/01/2024/029>

- [2] Frazelle, E. H. (2001). *World-class warehousing and material handling*. McGraw-Hill.
- [3] Baker, P., & Halim, Z. (2020). Warehouse management systems (WMS): Evolution and trends in logistics. *International Journal of Logistics Management*, 31(2), 345–362. <https://doi.org/10.1108/IJLM-02-2019-0039>
- [4] Yang, T., Li, X., & Wang, H. (2023). Adaptive integration of PLC-based control in warehouse automation using SCADA architecture. *Journal of Intelligent Manufacturing*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02019-7>
- [5] Sioud, R., Bamoumen, M., & Hamani, N. (2025). Optimal task assignment for multiple mobile robots using improved cost-based algorithm. In Khoukhi, F., & El Bouchti, Y. (Eds.), *Intelligent Systems in Cybernetics and Automation* (pp. 295–306). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-80775-6\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-031-80775-6_24)
- [6] Zhao, Y., Chen, Q., & Huang, J. (2024). Cybersecurity model for OPC UA-based industrial control networks in warehouse environments. *Computers & Industrial Engineering*, 183, 108093. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.108093>
- [7] Suleiman, L., Al-Dmour, R., & Ayub, M. (2022). Challenges in robotic integration with WMS/WCS: Protocol and hardware limitations. *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, 899–906. <https://doi.org/10.1109/CASE55865.2022.9895608>
- [8] Siemens Logistics. (n.d.). *Warehouse control systems (WCS)*. Retrieved July 8, 2025, from <https://www.siemens-logistics.com/en/portfolio/warehouse-control-systems/>
- [9] Groover, M. P. (2025). *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing* (4th ed.). Pearson.
- [10] Exotec. (2025). *Top warehouse automation trends for 2025*. Retrieved July 8, 2025, from <https://www.exotec.com>
- [11] AutoStore. (2024). *Warehouse robotics: A complete overview*. <https://www.autostoresystem.com>
- [12] Le, H. A., Vu, Q. C. D., Tran, B. T., Le, V. T., & Vuong, T. B. (2024). Collision avoidance problem for robots in smart warehouses using a focused decentralized reinforcement learning model. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 882, 271–282. <https://link.springer.com>
- [13] Think Robotics. (2025). *Robot obstacle avoidance: Techniques, challenges, and future trends*. <https://thinkrobotics.com>
- [14] Ouster. (2025). *Collision avoidance & obstacle detection in industrial systems*. <https://ouster.com>
- [15] inVia Robotics. (2024). *Solving warehouse bottlenecks with AI*. <https://inviarobotics.com>
- [16] KPI Solutions. (2025). *WCS, WES, and WMS: Key software in warehousing*. <https://kpisolutions.com>
- [17] Intellimeter. (2025). *Transforming logistics: The rise of high-power warehouses and smart energy systems*. <https://blog.intellimeter.com>
- [18] AZoRobotics. (2025). *Robotic feedback systems explained*. <https://www.azorobotics.com>
- [19] Britannica. (2025). *Automation – Feedback, control systems, robotics*. <https://www.britannica.com>
- [20] AutoStore. (2023). *Warehouse control systems: Ultimate guide*. <https://www.autostoresystem.com>
- [21] FS. (2023). *Comparing industrial Ethernet protocols*. <https://www.fs.com>
- [22] Logiwa. (2024). *The complete guide to warehouse management systems*. <https://www.logiwa.com>
- [23] Hy-Tek Intralogistics. (2023). *What is a warehouse control system?*. <https://hy-tek.com>
- [24] O3ai. (2025). *Modern warehouse stack: Understanding WMS, WES & WCS*. <https://www.o3ai.com>
- [25] Hopstack. (2024). *Warehouse control system explained*. <https://hoplog.com>



- [26] SAP Community. (2025). *Enhancing warehouse operations by integrating robotics*. <https://community.sap.com>
- [27] Pyrops. (2025). *Integration protocols for supply chain systems*. <https://pyrops.com>
- [28] Optcore. (2025). *What is industrial Ethernet: A complete guide*. <https://www.optcore.net>
- [29] Siggins. (2025). *Unraveling the interrelationship between ERP, WMS, WCS, and WES*. <https://siggins.com>

---

## **INTEGRATION OF CONTROL MECHANISMS INTO WAREHOUSE MANAGEMENT SYSTEMS (WMS/WCS): ENSURING THE EFFICIENCY OF ROBOTIC COMPLEXES**

Lesia Yuriivna Fedik

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Associate Professor at the Department of Automation and Computer-Integrated Technologies  
Lutsk National Technical University, Ukraine

**Summary.** *This article explores the evolution of warehouse logistics, focusing on the transition from manual operations to high-tech automated systems. It analyzes the growing demands for speed, accuracy, and cost-efficiency in modern logistics, which have driven widespread adoption of automation. The functional interplay between Warehouse Management Systems (WMS) and Warehouse Control Systems (WCS) is described, showing how they form a hierarchical architecture for robotic warehouse control. Key advantages of integration are emphasized, including increased productivity, improved accuracy, reduced operational costs, and enhanced traceability of goods flow. Regulatory mechanisms that enable coordination across system layers are examined, alongside core communication protocols and standards that support seamless data exchange.*

**Keywords:** *warehouse logistics, automated systems, WMS, WCS, hierarchical architecture, control mechanisms, resource management, productivity, traceability, industrial protocols, robotics, warehouse information systems, systems integration, warehouse automation.*