

УДК 004.89 : 621.865

Пономарьов Є.А.¹, Фурманова Н.І.²

¹ студ. гр. БК-611 НУ «Запорізька політехніка»

² доц. НУ «Запорізька політехніка»

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА СТАЛІЙ РОЗВИТОК АВТОМАТИХОВАНИХ СИСТЕМ АДАПТИВНОГО ПАКУВАННЯ

Інтенсифікація вимог щодо екологічності виробництва, посилення конкурентної напруги на світових ринках та зростання вартості трудових ресурсів спричинили критичну необхідність технологічної модернізації пакувальних процесів. Упровадження адаптивних маніпуляторних систем у виробничих лініях – проблематика, актуальність котрої зумовлена не лише економічними, а й екологічними чинниками. Аналіз ґрунтується на статистичних відомостях, дослідженнях провідних галузевих експертів, практичному досвіді впровадження маніпуляторів на пакувальних лініях і розглядає технологічні, економічні та екологічні аспекти в контексті індустріальної трансформації пакувальної галузі, що розкриває шляхи досягнення комплексної ефективності виробництва з одночасним зменшенням техногенного навантаження на довкілля.

Для оцінки економічної ефективності зазвичай використовують показники ROI (повернення інвестицій) та ТСО (загальні витрати володіння). Аналіз кейсів демонструє, що виробники упаковки досягають терміну окупності роботизованих рішень у межах 1–3 років завдяки суттєвому зниженню витрат на оплату праці (до 75% на лініях з високим рівнем ручних операцій) та підвищенню безперервності виробничих ліній [1]. Дослідження показують, що розрахунок ТСО для пакувальних ліній дозволяє виявити приховані витрати і скоротити загальні витрати протягом життєвого циклу обладнання на 20–30% [2]. Адаптивні маніпулятори з модульною архітектурою забезпечують швидку окупність завдяки можливості налаштування під різні типи продукції без суттєвих капіталовкладень, зменшуючи вартість переналагодження на 40–60% порівняно з традиційними рішеннями [3].

Оптимізація енергоспоживання та мінімізація відходів дозволяють підвищити економічну ефективність виробництва. Інтеграція високоефективних серводвигунів з регенеративними гальмами дозволяє повертати до 25% кінетичної енергії під час гальмувальних циклів, що суттєво знижує загальні витрати на електроенергію [4]. Адаптивні маніпулятори з інтелектуальним керуванням оптимізують траєкторії руху та збалансовують навантаження на приводи, додатково зменшуючи енергоспоживання на 15-25% порівняно зі стандартними роботизованими системами [5]. Застосування цифрових двійників та IoT-сенсорів забезпечує економію близько 10-15% енергії за рахунок оптимізації режимів роботи [6].

Дослідження інженерних рішень демонструє, що пакувальні матеріали, дозовані із високою точністю завдяки комплексу "машинний зір-адаптивний захват", скорочують надмірне використання сировини на 15-25%; водночас, тактильні сенсори зворотного зв'язку в конструкції захватів оптимізують прикладене зусилля при взаємодії з тендітними виробами, зменшуючи пошкодження продукції у межах 30-45% [7]. Недостатньо оціненим залишається технологічний потенціал систем "box-on-demand", котрі уже зараз забезпечують зниження витрат картону під час складських операцій на рівні 20% через механізм виготовлення тари з урахуванням індивідуальних габаритів конкретного виробу [8].

Поширення колаборативних роботів із мінімізованою складністю програмування сприяє доступності автоматизації для підприємств малого й середнього сегментів, причому експлуатаційні показники свідчать про зниження витрат на інтеграцію на 40-60% у порівнянні з класичними індустріальними рішеннями [11]. Практика впровадження на виробництвах із обмеженими людськими ресурсами маніпуляторів з інтуїтивними інтерфейсами програмування показує зменшення витрат на підготовку персоналу на 50-70% — фактор, що має значний вплив на рішення стосовно технологічної модернізації в секторі МСП [11].

Ринкові тенденції демонструють зростання попиту на модульні технологічні платформи з реалізованими функціями швидкої заміни робочих інструментів, що, згідно з виробничою статистикою, забезпечують скорочення часових витрат на переналаштування ліній у діапазоні 65-80%, підвищуючи ефективність функціонування підприємств у секторі дрібносерійного виробництва [12]. У сфері фінансових моделей з'явилися інноваційні пропозиції «Robotics-as-a-Service», котрі надають змогу невеликим виробничим компаніям імплементувати автоматизовані процеси з мінімальними стартовими капіталовкладеннями на основі регулярних платежів, що визначаються фактичним використанням обладнання [13].

Технічний аналіз засвідчує ефективність впровадження реконфігурованих мультифункціональних систем, у межах яких один

маніпуляторний комплекс послідовно виконує низку технологічних операцій (захоплення, переорієнтування, переміщення, фіксацію, запечатування), що фактично дає змогу оптимізувати використання виробничих площ до 40% з одночасним зниженням сукупних капітальних видатків на устаткування [14]. Неабиякий потенціал мають маніпулятори з інтегрованими механізмами машинного навчання, здатні до самоадаптації щодо варіацій геометричних характеристик об'єктів, завдяки чому відбувається зменшення потреби в додаткових інвестиціях при переході до нових виробів на 30-50% [15].

Комплексний аналіз функціонування адаптивних маніпуляторів у пакувальному сегменті виробництва свідчить про наявність трьох значимих аспектів: по-перше, це гарантоване фінансово-економічне зростання через швидку окупність інвестицій та значне скорочення сукупних експлуатаційних видатків; по-друге, забезпечення енергетичної оптимізації й мінімізації матеріальних відходів; по-третє, реалізація принципів циркуляторної економіки з одночасним підвищенням доступності передових технологій для широкого кола виробників за рахунок модульності та масштабованості системних рішень. Сумарно ці фактори підкреслюють визначальну роль маніпуляторних систем у наблизненні вітчизняних пакувальних виробництв до стандартів Індустрії 4.0, що забезпечує збалансоване поєднання економічних показників, екологічної відповідальності й соціальної стабільності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Sparck Technologies – What is the ROI of automated packaging? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sparcktechnologies.com/what-is-the-roi-of-automated-packaging/>
2. BW Packaging – How to Calculate the Total Cost of Ownership (TCO) for Packaging Lines & Machinery [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.bwpackaging.com/blog/post/blog/2022/01/21/tco-packaging-lines--machinery>
3. PwC – Building ROI for smart factory transformation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.pwc.com/us/en/library/case-studies/roi-smart-factory.html>
4. MEPCА Engineering – Robots with regenerative braking help to reduce energy costs [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mepca-engineering.com/robots-with-regenerative-braking-help-to-reduce-energy-costs/>
5. ABB Robotics – Energy Efficiency Service press release [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://new.abb.com/news/detail/119894/prsrl-abb-robotics-launches-energy-efficiency-service-to-help-customers-save-costs-and-enhance-sustainability>

6. Packaging World – Predictive Maintenance Rising Fast in Packaging and Processing [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.packworld.com/trends/digital-transformation/article/22871046/predictive-maintenance-rising-fast-in-packaging-and-processing>
7. DHL Supply Chain – Packaging waste reduction and box-on-demand [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dhl.com/content/dam/dhl/global/csi/documents/pdf/glo-csi-sustainable-packaging-and-circularity.pdf>
8. DHL Supply Chain – Reducing environmental footprint through packaging [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dhl.com/content/dam/dhl/global/core/documents/pdf/dhl-sustainability-case-study-reducing-environmental-footprint-through-packaging.pdf>
9. ScienceDirect – Packaging design for the circular economy: A systematic review [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235255092200152X>
10. Siemens – Maximising your ROI with scalable, predictive maintenance [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:854533af-0f63-46d2-8534-324cf0bbb161/ROI-Report_original.pdf
11. Food Industry Executive – 5 Ways Cobots Make Automation Accessible to SMEs [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://foodindustryexecutive.com/2021/11/5-ways-cobots-make-automation-accessible-to-smes/>
12. Syntegon – Robotic Pick & Place (RPP) platform [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.syntegon.com/solutions/food/robotic-packaging/>
13. SME News – Exploring the Importance of Supply Chain Automation in SMEs [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://smenews.digital/exploring-the-importance-of-supply-chain-automation-in-smes/>
14. Flexlink – BRIXX® modular packaging automation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.flexlink.com/en/portfolio/cobots-and-robots/packing-automation>
15. Sustainability Packaging – Optimized Packaging Cost, Filling, and Sustainability [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sustainabilitypackaging.com/ai-driven-roi>