

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ МАШИН ДЛЯ ПОСАДКИ КАРТОПЛІ

*Борак К.В., Вакулін В.В.
Поліський національний університет*

Картопля є однією з найпоширеніших культур у світі; її вирощування забезпечує мільйони фермерських господарств і є важливою частиною продовольчої безпеки. Посадка бульб вимагає значних трудових ресурсів і точності розміщення, оскільки неправильна відстань між рослинами і нерівномірна глибина призводять до втрат урожаю і погіршення якості. Механізовані сівалки дозволяють зменшити трудові затрати, підвищити продуктивність і забезпечити рівномірну густоту посадки. Економічний аналіз механізованої посадки показує, що використання дворядної саджалки з регульованою шириною міжрядь та одночасним внесенням добрив зменшує витрати на 37,5 % порівняно з ручною працею і забезпечує рівномірну густоту рослин.

У роботі розглянуто сучасний стан технічних засобів для посадки картоплі, їх основні типи та недоліки. Окремо аналізуються перспективні напрямки розвитку: удосконалення механічних систем подачі, впровадження електромеханічних та електронних дозувальних пристроїв, використання сенсорів і штучного інтелекту для контролю якості посіву, перехід до електрифікованих машин та роботизованих комплексів. Акцентовано увагу на економічних, екологічних та соціальних аспектах впровадження нових технологій.

Зараз у світі застосовують переважно дві схеми подачі бульб: ланцюгово-ложкові та вакуумні (присмоктувальні) апарати. Ланцюгово-ложкові саджалки відносно прості та дешеві, але мають високий відсоток подвійної посадки і пропусків, особливо при висаджуванні нарізаних бульб. Вакуумні системи забезпечують кращу сингуляцію, але залежать від стабільної потужності вентилятора і засмічуються при обробленні великої кількості бульб різної форми. Рівень пропусків і надлишкових висадок сильно залежить від швидкості руху машини, коливань ґрунту і розмірів насінневого матеріалу.

Сучасні технології вирощування картоплі передбачають точне дотримання відстані між рослинами (зазвичай 25–40 см), рівномірну глибину закладання (6–10 см) та мінімальну кількість пропусків і подвійних посадок. Дослідження показують, що механізована посадка забезпечує рівномірну популяцію рослин і підвищує врожайність порівняно з ручною працею. Тому виробники шукають технологічні рішення, які дозволять одночасно підвищити точність дозування, контролювати глибину та відстань, скоротити витрати на робочу силу і адаптувати машину до різних умов поля.

Найбільш актуальною проблемою картоплесаджалок є пропуски посадки (відсутність бульби у лунці) та подвійні висадки. У 2025 р. група дослідників [1] розробила високоточну електронну систему дозування з автоматичним виявленням пропусків і пересаджуванням, що складається з п'яти модулів: блок первинної посадки, механізм автоматичного пересаджування, контролер управління, джерело живлення і програмно-апаратний інтерфейс. На оптимальній відстані між бульбами 41,24 см і швидкості 2,13 км/год система досягала 98,7 % коефіцієнта якості посадки та 100 % коефіцієнта пересаджування; її вартість становить близько 130 USD [1].

У роботі відзначено, що помилки дозування виникають через конструктивні недоліки апарату та зміну фізичних властивостей ґрунту; для їх компенсації пропонуються сенсорні системи контролю з фотоелектричними або волоконно-оптичними датчиками, які відстежують пропуски і вчасно активують механізм повторної висадки [1]. Такий підхід може стати основою для створення модульних електронно-керованих саджалок з можливістю адаптації відстані між бульбами, зміни швидкості та автоматичного самокалібрування.

З розвитком глибинного навчання з'явилися системи, що оцінюють роботу саджалки в реальному часі. Поліпшений алгоритм YOLOv5n разом із трекером ByteTrack дозволяє визначати кожен насінневий шматок та відповідну ложку у полі зору камери і з точністю 96,6 % підраховувати пропуски, подвійні висадки та правильне висаджування [2]. Система скорочує параметри базової нейромережі більш ніж на половину,

зберігаючи високу точність ($mAP \approx 98\%$), і може працювати на мобільних пристроях.

Завдяки об'єднанню детектора YOLO з алгоритмом відстеження ByteTrack машина отримує реальний підрахунок бульб, що дозволяє оператору оперативно коригувати подачу насіннєвого матеріалу [2]. Перевага таких систем полягає в можливості інтеграції з GPS-навігацією та контролем глибини, що відкриває шлях до автономних самонавігаційних саджалок.

Післясортовані або нарізані бульби мають різну форму і розмір, що призводить до подвійних і пропущених посадок. Китайські дослідники створили новий ложковий апарат, який містить відокремлювач надлишкових бульб і систему гасіння інерції ложки. Під час bench-випробувань оптимальною була швидкість зірочки близько 35 об/хв; у полі досягнуто 91,5 % кваліфікованої посадки, 3,1 % пропусків і лише 5,4 % подвійних висадок [3]. Даний результат демонструє потенціал адаптивних ложкових апаратів для робіт з нарізаними бульбами та важкими ґрунтовими умовами.

У районах з нестачею вологи та високим випаровуванням використовують плівкове мульчування. Китайський колектив розробив машину, яка одночасно формує гребінь, пробиває отвори у пластиковій плівці, висаджує бульби та засипає їх. Під час випробувань точність дотримання глибини посадки під плівкою становила 95,6 % [4]. Автори зазначають, що подальші дослідження мають зосередитись на пристроях для стабілізації відстані між рослинами, які не залежать від швидкості руху машини; для цього пропонується застосувати безступінчасті приводи та цифрове керування.

Нова система Seed Sensing від компанії Bluefield Seeding Solutions базується на тому, що посадкові катки оснащуються датчиками, які фіксують контакт з кожною бульбою при її укладанні в ґрунт. Ця технологія надає точні координати кожного насіннєвого матеріалу, визначає кількість ідеальних, невдалих, подвійних висадок та пропусків і дозволяє операторам контролювати продуктивність саджалки в реальному часі без виходу з трактора. Дані передаються на мобільний додаток, де фермер може переглядати середню відстань між бульбами, норму висіву та інші показники, а також віддалено спостерігати за роботою машини. Накопичення інформації про кожне поле допомагає аналізувати продуктивність, оптимізувати норму висіву та зменшувати витрати.

Нова система Seed Sensing від компанії Bluefield Seeding Solutions базується на тому, що посадкові катки оснащуються датчиками, які фіксують контакт з кожною бульбою при її укладанні в ґрунт. Ця технологія надає точні координати кожного насіннєвого матеріалу, визначає кількість ідеальних, невдалих, подвійних висадок та пропусків і дозволяє операторам контролювати продуктивність саджалки в реальному часі без виходу з трактора. Дані передаються на мобільний додаток, де фермер може

переглядати середню відстань між бульбами, норму висіву та інші показники, а також віддалено спостерігати за роботою машини. Накопичення інформації про кожне поле допомагає аналізувати продуктивність, оптимізувати норму висіву та зменшувати витрати.

У майбутньому роботи доповнюватимуть традиційні саджалки та виконуватимуть кілька функцій: посадка, підгортання, догляд, обробіток бур'янів і збір даних. За даними PotatoPro, роботизовані системи допомагають вирішити проблему нестачі робочої сили; автоматизація дозволяє виконувати повторювані операції, такі як посадка, із точністю, що зменшує перевитрати води, добрив і засобів захисту. Оцінюється, що роботизація може підвищити урожайність картоплі на 20 % і зменшити витрати ресурсів до 85 %, а також скоротити потребу в ручній праці до 60 %.

Основними видами робіт є:

Роботи-саджалки – автономні машини, які з GPS та сенсорами висаджують бульби на задану глибину і з точним кроком.

Роботи для прополювання – за допомогою камер та алгоритмів комп'ютерного бачення відрізняють рослини картоплі від бур'янів, видаляючи останні без застосування гербіцидів.

Роботи-збирачі – використовують м'які робочі органи для акуратного викопування і збору бульб, що зменшує їх травмування.

Роботи для моніторингу – їздять або літають над полем, збираючи дані про вологість ґрунту, стан рослин та шкідників; це дозволяє оперативно реагувати на проблеми.

Разом із тим роботизація стикається з бар'єрами: високою вартістю, складним рельєфом та ґрунтовими умовами, потребою в кваліфікованих операторах, залежністю від погодних умов, вузькою спеціалізацією машин і проблемами зі зв'язком та електроживленням. Тому перспективним напрямком є створення модульних роботів, здатних виконувати кілька операцій на різних етапах виробництва, а також розвиток інфраструктури для технічного обслуговування.

Безпілотники, супутники та ґрунтові сенсори формують цифрові карти полів, що дозволяє оптимізувати посадку та догляд за картоплею. За словами експертів Spud Smart, фермери вже застосовують спектральні знімки, аналіз вологості та рівня живлення ґрунту за допомогою датчиків, а автономні машини, оснащені комп'ютерним зором, здатні точково вносити добрива та засоби захисту. Величезні обсяги даних, що збираються через телематику, дозволяють плантарам навчатися на власних помилках, а також отримувати віддалені оновлення програмного забезпечення. Аналіз цих даних через системи підтримки прийняття рішень допомагає фермеру вибрати оптимальну густоту посадки, дату висадження та норми внесення добрив з урахуванням прогнозу погоди і стану ґрунту.

Переваги механізації для фермерів виходять за межі зменшення робочих витрат. В Індонезії застосування механічної саджалки з добриворозкидачем збільшило доходи на 22,8 млн індонезійських рупій на гектар і забезпечило коефіцієнт вигоди – витрат 1,55 (вища рентабельність, ніж ручна посадка) [5].

Автоматичні, електронно-керовані плантарі дозволяють скоротити споживання насіннєвого матеріалу та добрив, що позитивно впливає на навколишнє середовище та зменшує викиди CO₂. Використання роботів і електрифікації сприяє зниженню енергоспоживання та шумового забруднення. Крім того, зменшення потреби в ручній праці дозволяє операторам виконувати складніші завдання (управління та аналітика), що змінює структуру сільськогосподарської зайнятості.

Разом з тим, висока вартість обладнання, потреба в навчанні персоналу і адаптація до різних ґрунтових умов залишаються ключовими бар'єрами. За даними ринкових досліджень, вартість автоматичних картоплесаджалок і вимоги до інфраструктури стримують дрібних фермерів; для розширення використання необхідні фінансові програми, оренда техніки, модульний дизайн та локальне сервісне обслуговування

Сучасні дослідження та практичні розробки показують, що майбутнє машин для посадки картоплі лежить на перетині механіки, електроніки, цифрових технологій та робототехніки. Основними тенденціями є:

Перехід до високоточних електромеханічних дозувальних систем – застосування електроприводів, безступінчастих редукторів і автоматичного пересаджування дозволяє значно знизити частоту пропусків і подвійних висадок.

Інтеграція сенсорів та комп'ютерного зору – камери та алгоритми глибинного навчання забезпечують реальний моніторинг висадки, дозволяють вчасно виявляти помилки й оптимізувати роботу без зупинки машини.

Використання електрифікованих та гібридних приводів – електричні машини забезпечують точніший контроль і нижче енергоспоживання; перехід до електротрансмісій у тракторах відкриває нові можливості для живлення саджалок.

Розвиток роботизованих і автономних систем – роботи-саджалки, бур'яноуборочні і збиральні роботи доповнюватимуть класичні агрегати, дозволяючи суттєво скоротити потребу в робочій силі та підвищити продуктивність.

Цифрова аналітика і «розумні» ферми – поєднання роботизованих машин, датчиків, супутникового моніторингу та систем підтримки прийняття рішень дозволить точно планувати строки посадки, оптимізувати норми добрив, прогнозувати врожайність та знижувати витрати.

Для успішного впровадження цих технологій необхідно забезпечити доступність нових машин для дрібних і середніх фермерів, удосконалити навчальні програми, розвинути сервісні мережі та підтримати міжнародну

кооперацію в галузі точного землеробства. Окрім того, важливим є адаптація техніки до локальних умов: різних типів ґрунту, клімату і сорту картоплі. При дотриманні цих умов технологічний прогрес зробить виробництво картоплі більш стійким, екологічним та економічно вигідним.

Список використаних джерел

1. Abdallah Elshawadfy Elwakeel, Ahmed Elbeltagi, Ali Salem, Ahmed Z Dewidar. Optimized design and performance evaluation of a highly precise variable rate mis-planting and replanting potato electronic-metering mechanism. *Front Plant Sci.* 2025 May 16;16:1531377. doi: 10.3389/fpls.2025.1531377.

2. Cisen Xiao, Changlin Song, Junmin Li, Min Liao, Yongfan Pu, Kun Du Potato precision planter metering system based on improved YOLOv5n-ByteTrack. *Front Plant Sci.* 2025 Apr 28;16:1563551. doi: 10.3389/fpls.2025.1563551.

3. Jiarui Wang, Min Liao, Chao Su, Rui Chen, Hailong Xia, Junju Li, Chenyang Qiao. Study on the excess seeds removing performance of a potato precision seed metering device. *Sci Rep.* 2024 Nov 13;14:27832. doi: 10.1038/s41598-024-79635-1.

4. Baowei Li, Wei Sun, Wei Sun, Zhiwei Zhao, Petru A. Simionescu. Development and Validation of a Potato Seeding Machine with Integrated Plastic Film Mulch Punching Mechanism. *Agronomy* 2024, 14(7), 1570; <https://doi.org/10.3390/agronomy14071570>.

5. Dewi Sahara, Cahyati Setiani, Dewa Ketut Sadra Swastika, Robet Asnawi, Sri Bananiek Sugiman, Andi Yulyani Fadwiwati, Tota Suhendrata, Amiruddin Syam, Agus Supriyo, Atman, Triyani Dewi. Strategy formulation of agricultural machinery development for sustainable potato farming in upland of Banjarnegara Regency, Central Java, Indonesia. *Heliyon.* 2024 Oct 21;10(21):e39637. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e39637.