

-  $\text{MoS}_2$  (дисульфід молібдену) – це класичний твердий мастильний матеріал, він працює навіть за часткової втрати мастила та ефективний за значень граничного тертя (особливо корисний: для тракторних дизелів, що працюють під великим навантаженням).

- *DLC*-покриття (алмазоподібний вуглець) - наноструктуроване вуглецеве покриття, яке має дуже низький коефіцієнт тертя (0,05–0,15) та високу зносостійкість (застосовується: на поршневих пальцях, кільцях, штовхачах).

Підшипники колінчастого валу

Найкращі нанодобавки:  $\text{WS}_2$  (дисульфід вольфраму) — витримує високі тиски; наночастинки  $\text{Cu}$  або  $\text{Ag}$  — покращують тепловідведення; нанокompозитні полімерні вкладиші (**результат**: зниження зносу до 30–40%).

Розподільчий механізм (кулачки – штовхачі)

Використовуються: *DLC*-покриття, наноструктурований  $\text{TiN}$ , графенові присадки до мастила (це критично важливо, бо тут високий контактний тиск).

Трансмсія (коробка передач, редуктори)

Зубчасті передачі

Ефективні нанорішення:

- наночастинки:
- оксидів ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ) - заповнюють мікронерівності, формують захисний шар;
- $\text{WS}_2$  та  $\text{MoS}_2$  - утворюють шар ковзання за граничного тертя;
- наноструктуровані  $\text{CrN}$  або  $\text{TiAlN}$  покриття, які підвищують твердість поверхні зубців шестерень.

Особливо актуально для тракторів, у яких великі крутні моменти.

Підшипники кочення

Найефективніше: графенові мастила; нанодобавки на основі бору ( $\text{h-BN}$ ); текстурування поверхонь + нанопокриття.

Зменшення шуму і нагріву.

Гідросистеми тракторів

Ефективними рішеннями проблеми зношування плунжерів та клапанів є: нанопокриття  $\text{TiN}$ ; наночастинки  $\text{SiO}_2$ ; графенові добавки до гідравлічної рідини.

Отже основними перевагами нанорішень у зниженні тертя є: зменшення енергетичних втрат; підвищення ресурсу вузлів; зниження шуму й вібрації; підвищення економії пального; менша витрата мастила.

За прогнозами найбільш перспективними у найближчому майбутньому у технологіях виробництва сільськогосподарської техніки (трактори, автомобілі, комбайни і т.ін.) будуть широко використовуватися: графенові присадки, *DLC*-покриття, нанокompозитні мастила з  $\text{WS}_2$ , самоорганізовані трибоплівки [2; 3].

#### Список використаних джерел

1. Краснобокий Ю.М., Мартинюк М.Т., Хитрук В.І. У світі нанотехнологій: навч.посібник. Умань: ПП Жовтий О.О., 2010. 112 с.

2. Чмерук М.О. Нанотехнології в машинобудуванні: стан і перспективи. Сільськогосподарське машинобудування України очима молоді: проблеми, пошуки, перспективи [зб.матер. IV студентської наук.-практ.конф.]. Умань: ВПЦ «Візаві», 2013. С.151-155.

**95. Мітков В. Б. Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного м. Мелітополь, Україна.**

#### РОБОТИЗОВАНІ СИСТЕМИ У РОСЛИННИЦТВІ ЯК ФАКТОР ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА

Сучасний розвиток аграрного виробництва характеризується інтенсивним впровадженням цифрових технологій, автоматизації та роботизації технологічних процесів. Зростання світового попиту на продовольство, обмеженість природних ресурсів, зміна клімату та дефіцит трудових ресурсів зумовлюють необхідність пошуку нових технічних рішень для підвищення продуктивності сільського господарства. Одним із найбільш перспективних напрямів інноваційного розвитку є використання роботизованих систем у рослинництві, що дозволяють автоматизувати виконання агротехнічних операцій і забезпечити високий рівень точності виробничих процесів.

Особливого значення набуває досвід країн Північної Європи — Швеції, Данії та Норвегії, де роботизація аграрного сектору розглядається як ключовий інструмент реалізації концепції прецизійного землеробства. Впровадження автономних аграрних машин, сенсорних систем моніторингу стану ґрунту та рослин, а також систем штучного інтелекту забезпечує підвищення продуктивності виробництва і водночас сприяє зменшенню негативного впливу на довкілля [1, 2, 3, 4].

Метою дослідження є аналіз технічних рішень та практик використання роботизованих систем у рослинництві на прикладі Скандинавських країн та оцінка можливостей їх адаптації для аграрного сектору України.

У сучасних умовах розвитку прецизійного землеробства сформувався комплекс роботизованих технологічних рішень, які можуть бути інтегровані у виробничі процеси рослинництва. До них належать автономні наземні роботизовані платформи, безпілотні літальні апарати для моніторингу посівів, автоматизовані системи сівби, обприскування та збору врожаю.

Одним із прикладів сучасних роботизованих систем є модульна аграрна платформа Thorvald, розроблена у Норвезькому університеті наук про життя (NMBU). Дана система призначена для виконання широкого спектра агротехнічних операцій — від міжрядної культивування до моніторингу стану рослин та збору врожаю. Робот оснащений системами навігації GNSS та LIDAR, що дозволяє здійснювати переміщення з точністю до кількох сантиметрів [2, 4].

Іншим прикладом є автономний агрегат Robotti, створений у Данії, який може виконувати операції передпосівного обробітку ґрунту, сівби та локального внесення засобів захисту рослин. Використання таких машин дозволяє значно скоротити витрати пального, підвищити точність агротехнологічних операцій та знизити антропогенне навантаження на ґрунтовий покрив [1].

Важливим напрямом розвитку роботизованих систем є інтеграція наземних платформ із безпілотними літальними апаратами. У цьому випадку дрони здійснюють дистанційний моніторинг посівів із застосуванням мультиспектральних сенсорів та аналізу індексу NDVI, після чого наземні роботи виконують точкову обробку проблемних зон поля. Така технологія дозволяє зменшити використання агрохімікатів і підвищити ефективність догляду за культурами.

Результати досліджень, проведених на агропідприємствах Скандинавських країн, свідчать про значний економічний та екологічний ефект від використання роботизованих технологій. Зокрема, впровадження автономних систем дозволяє підвищити продуктивність агровиробництва на 15–25 %, скоротити витрати пального та агрохімікатів до 30 %, а також зменшити негативний вплив на довкілля [3].

Для кількісної оцінки результативності впровадження автономних машин доцільно використовувати інтегральний індекс ефективності роботизованої системи, який враховує продуктивність, витрати ресурсів, енергоспоживання та надійність техніки.

$$K_{ef} = w_1 \cdot \frac{Q_{rob}}{Q_{trad}} + w_2 \cdot \frac{C_{trad}}{C_{rob}} + w_3 \cdot \frac{E_{trad}}{E_{rob}} + w_4 \cdot \frac{K_{ready,rob}}{K_{ready,trad}} + w_5 \cdot \frac{\delta_{trad}}{\delta_{rob}} \quad (1)$$

де

$K_{ef}$  — інтегральний індекс ефективності роботизованої системи;

$Q$  — продуктивність машин (га/год);

$C$  — витрати ресурсів (грн/га);

$E$  — енерговитрати (кВт·год/га або л/га);

$K_{ready}$  — коефіцієнт технічної готовності;

$\delta$  — похибка виконання технологічної операції;

$w_i$  — вагові коефіцієнти.

Інтерпретація показника є наступною:

- $K_{ef} > 1$  — роботизована система є ефективнішою за традиційну техніку;
- $K_{ef} = 1$  — рівень ефективності є однаковим;
- $K_{ef} < 1$  — застосування роботизованої системи є економічно або технічно недоцільним.

Важливим параметром у формулі (1) є коефіцієнт технічної готовності, який характеризує надійність роботи автономної машини:

$$K_{ready} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2)$$

де MTBF — середній час безвідмовної роботи машини;

MTTR — середній час відновлення після відмови.

Запропонований індекс дозволяє виконувати комплексну техніко-економічну оцінку роботизованих систем у рослинництві, враховуючи продуктивність машин, енергетичну ефективність, точність виконання агротехнічних операцій та надійність функціонування. Його використання створює можливість обґрунтовано порівнювати традиційні та автономні технології обробітку ґрунту, сівби або догляду за культурами та визначати економічну доцільність їх впровадження у виробничу практику.



Рис. 1. Концептуальна модель інтегральної оцінки ефективності роботизованих систем у рослинництві.

Джерело: сформовано автором на основі дослідження [5]

Запропонований індекс дозволяє виконувати комплексну техніко-економічну оцінку ефективності використання роботизованих систем у рослинництві та визначати доцільність їх впровадження у виробничу практику.

Додаткові дослідження, проведені на основі моделювання експлуатації автономних електричних тракторів, показали можливість зниження енергоспоживання на гектар до 47–75 % порівняно з традиційною дизельною технікою. Одночасно відзначається суттєве зменшення ущільнення ґрунту завдяки використанню легких роботизованих агрегатів.

Польові випробування роботизованого культиватора Ekobot WEAI продемонстрували зниження використання гербіцидів до 70 % без втрати врожайності. Це свідчить про значний потенціал роботизованих технологій у підвищенні екологічної безпеки аграрного виробництва [1, 7].

Разом з тим, адаптація роботизованих технологій до умов українського агросектору потребує врахування низки факторів. До основних бар'єрів належать високі початкові інвестиції, недостатній

рівень цифрової інфраструктури в сільській місцевості, а також дефіцит кваліфікованих спеціалістів для обслуговування роботизованих комплексів.

Важливим напрямом подальшого розвитку є формування державної політики підтримки інновацій у сільському господарстві, що передбачає стимулювання впровадження цифрових технологій, розвиток сервісної інфраструктури та підготовку фахівців з експлуатації роботизованих систем.

Отже, роботизація рослинництва є одним із ключових напрямів модернізації аграрного виробництва. Досвід Скандинавських країн демонструє значний потенціал використання автономних агротехнічних систем для підвищення ефективності виробництва, оптимізації використання ресурсів та зниження екологічного навантаження. Впровадження подібних технологій в Україні може стати важливим чинником підвищення конкурентоспроможності національного аграрного сектору та переходу до сталих моделей ведення сільського господарства.

#### **Список використаних джерел**

1. Barbosa Júnior M.R. Advancements in Agricultural Ground Robots for Specialty Crops: An Overview of Innovations, Challenges, and Prospects // *Plants*. 2024. Vol. 13, № 23. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13233372>.

2. Grimstad L., From P.J. Thorvald II – a modular and reconfigurable agricultural robot // *IFAC-PapersOnLine*. 2017. Vol. 50, № 1.

3. Lagnelöv J. Electric autonomous tractors in Swedish agriculture: a systems analysis of economic, environmental and performance effects. Swedish University of Agricultural Sciences, 2023.

4. Pedersen S.M., Fountas S., Have H., Blackmore B.S. Agricultural robots — system analysis and economic feasibility // *Precision Agriculture*. 2017.

5. Мітков, В. Б. Використання роботизованих систем у рослинництві: аналіз практик прецизійного землеробства скандинавських країн. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету, 15(2), 83-92. 2025 <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-10>

6. Шеремет А.М., Шеремет О.І., Литвин О.М. Цифровізація аграрного виробництва в умовах сталого розвитку сільських територій // *Економіка та прогнозування*. 2021.

7. Ekobot AB. Field Trials Report: Autonomous Weeding in Onion Production in Sweden [Електронний ресурс]. 2022. URL: <https://www.ekobot.se> (дата звернення: 04.03.2026).

**96. Голотюк М.В., Пилипака Т.С., Валецька О.В. Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна.**

#### **АНАЛІЗ ВПЛИВУ ШВИДКІСНИХ РЕЖИМІВ РУХУ ТЕХНІКИ НА ДЕФОРМАЦІЮ ГРУНТОВОГО МАСИВУ**

Інтенсивна механізація сучасного сільського господарства супроводжується зростанням маси та потужності сільськогосподарської техніки, що призводить до значного підвищення антропогенного навантаження на ґрунтовий покрив. У процесі виконання польових робіт машинно-тракторні агрегати багаторазово переміщуються по поверхні поля, створюючи значні контактні напруження у ґрунтовому масиві. Це спричиняє деформацію та ущільнення ґрунту, зміну його фізико-механічних властивостей, порушення структури та погіршення водно-повітряного режиму. Як наслідок, знижується біологічна активність ґрунту, ускладнюється розвиток кореневої системи рослин і зменшується врожайність сільськогосподарських культур [1].

Одним із важливих факторів, що впливають на процеси деформації ґрунтового масиву, є швидкісний режим руху сільськогосподарської техніки. Швидкість руху агрегату визначає характер взаємодії ходових систем машин із ґрунтом, тривалість контакту рушіїв із поверхнею поля, величину динамічних навантажень та інтенсивність передавання напружень у глибші шари ґрунту. Зі збільшенням швидкості руху змінюється характер деформаційних процесів у ґрунті, зростає динамічний вплив навантаження, що може призводити до руйнування верхнього шару ґрунту, формування колій та переміщення ґрунтових частинок [2].

У процесі руху машинно-тракторних агрегатів у ґрунті формується складний напружено-деформований стан, який визначається дією вертикальних і горизонтальних сил, що передаються через колеса або гусеничні рушії. Під впливом цих сил ґрунт зазнає стискання, зсуву та часткового руйнування структури. Величина і характер деформації залежать від швидкості руху техніки, маси агрегату, площі контакту рушіїв із ґрунтом, внутрішнього тиску в шинах, а також від фізико-механічних властивостей самого ґрунту.