

заряду / О.В. Грицюк, А.П. Кузьменко, В.А. Дробязко, Д.І. Коваленко // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2025. – №2. – С. 18-25.

5. GTX3071R GEN II 54mm <https://www.garrettmotion.com/racing-and-performance/performance-catalog/turbo/gtx3071r-gen-ii/>

URL: <https://www.garrettmotion.com/racing-and-performance/performance-catalog/turbo/gtx3071r-gen-ii/> (дата звернення: 01.10.2025).

6. EMU BLACK <https://www.ecumaster.com/products/emu-black/>

URL: <https://www.ecumaster.com/products/emu-black/> (дата звернення: 2.10.2025).

УДК 631.372:004.8

## НЕЙРОКООРДИНАТОР СИНХРОННОЇ РОБОТИ КОЛІСНОГО ТРАКТОРА ТА ЗНАРЯДДЯ: ОПТИМІЗАЦІЯ ШВИДКІСНИХ РЕЖИМІВ І ТРАЄКТОРІЙ ПОЛЯ

**Макаренко Микола Григорович**, доцент каф. «Трактори і автомобілі»,  
Державний біотехнологічний університет,  
e-mail: mak\_nk@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4078-9045

**Шевченко Ігор Олександрович**, канд. техн. наук, доцент, завідувач каф.  
«Трактори і автомобілі», Державний біотехнологічний університет,  
e-mail: igorshvchnk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1280-5290

**Пирву Михайло Васильович**, аспірант,  
Державний біотехнологічний університет,  
e-mail: mykhailopyrvu@gmail.com

Синхронна робота колісного трактора із навісним/причіпним знаряддям вимагає узгодження траєкторії, швидкості руху, тягового режиму та станів знаряддя з урахуванням рельєфу, неоднорідності ґрунту та технологічних вимог операції. Неповне узгодження призводить до збільшення перекриттів/пропусків, надмірного буксування, зростання питомих витрат пального та погіршення якості виконання технологічних операцій. Сучасні автопілоти переважно стабілізують курс трактора, не враховуючи уніфіковано поведінку знаряддя й динаміку зчеплення на змінному рельєфі [1–7]. Це мотивує створення нейрокоординатора — інтелектуального модуля, який на основі даних бортової телематики, карт рельєфу/ґрунту та навченої моделі прогнозує наслідки керувань і узгоджує швидкісні режими та траєкторії для підвищення ефективності польових проходів.

Мета роботи - розробити та валідувати нейрокоординатор синхронної роботи «трактор–знаряддя», який оптимізує траєкторії поля та швидкісні режими з урахуванням рельєфу, стану ґрунту, обмежень виконавчих систем і технологічних вимог, мінімізуючи к, перекриття/пропуски та питомі витрати пального.

Нейрокоординатор реалізовано як ієрархічну систему з трьома рівнями

1. Планувальник покриття поля (offline/online) формує базову стратегію проходів та оптимізує послідовність і форму проходів з урахуванням меж ділянки, поворотних смуг, перешкод, ухилів і «вартісної карти» ґрунту (прогноз буксування, тягового опору та контактного тиску).

2. Онлайн-синхронізація швидкості та станів узгоджує цільову швидкість, параметри навіски, тиски в шинах (CTIS) та (за наявності) розподіл баласту між осями, щоб втримувати буксування у допустимому діапазоні, зменшувати контактний тиск і забезпечувати технологічні режими знаряддя.

3. Виконавчий рівень інтегровано з інтерфейсами ISO 11783 (ISOBUS) та J1939 для обміну даними й подачі команд (TC/VT), працює як автономний контролер або як рекомендаційний модуль для оператора.

Використовуються: GNSS/RTK (траєкторія, швидкість), IMU (ухили, динаміка), телематика J1939 (оберти/крутний момент, витрата пального), ISOBUS (стани знаряддя, культивацийні параметри), CTIS (тиски/швидкість зміни), цифрова модель висот, агромапи вологості/щільності (польові датчики та/або історичні карти). Дискретизація 1–5 Гц; синхронізація часових міток; базове фільтрування.

Нейропередиктор к оцінює майбутню інтенсивність буксування за поточних керувань та опису факторів (кінематика, ухили, ознаки ґрунту, шини, налаштування знаряддя).

Сурогати для питомих витрат пального та середнього контактного тиску застосовуються у вартості оптимізації.

Фізична узгодженість забезпечується регуляризаціями та обмеженнями, що відображають закономірності терамеханіки (монотонні залежності, енергетичні межі) [5–9].

З метою оптимізації траєкторій і швидкісних режимів планувальник мінімізує довжину та «складність» маршруту (з урахуванням поворотів/перестроювань) і одночасно коригує показники на ділянках зі складними умовами (вологість, ухил) для зменшення сумарного буксування та витрат.

Онлайн-координатор використовує передбачення рельєфу: заздалегідь коригує цільові тиски у шинах і швидкість на підході до підйомів чи вологих зон; на поперечних ухилах узгоджує тиск і навантаження на осі для збереження керованості й зчеплення.

Обмеження враховують діапазони тиску/швидкості його зміни, допустимі осьові навантаження, геометрію/динаміку поворотів на загінках, вимоги технологічного процесу (глибина, швидкісні вікна знаряддя).

Оцінювання здійснюється по ефективності покриття (зменшення перекриттів/пропусків, %), частка продуктивного часу (%), середнє й пікове буксування, питомі витрати пального (л/га), тривалість маневрів на загінках, рівномірність технологічного показника (наприклад, варіація глибини обробітку або відстаней між насінням).

Валідація проходить у два етапи: цифровий двійник поля з параметризованими картами ґрунту/рельєфу, щоб безпечно дослідити широке коло сценаріїв; польові випробування на виробничих ділянках із порівнянням

до базових налаштувань (стандартні автопілотні траєкторії, фіксований тиск у шинах та емпіричні правила оператора).

У симуляційних експериментах нейрокоординатор стабільно знижував сумарний рівень буксування на складних ділянках рельєфу, зменшував обсяг перекриттів на повторюваних проходах і скорочував непродуктивний час на загінках завдяки узгодженню швидкісних режимів, раціональному порядку обробітку та завчасним корекціям тиску в шинах. На вхідних агромапах із підвищеною вологістю система перерозподіляла швидкість та налаштування виконавців так, щоб зменшити контактний тиск і не перевищувати встановлені обмеження по керованості.

Початкові польові перевірки підтверджують керованість підходу: координовані дії по CTIS/навісці знижують пікові значення буксування на підйомах, покращують стабільність курсу і забезпечують більш рівномірний технологічний результат у порівнянні з базовими стратегіями. Якість рішень суттєво залежить від адекватності карт рельєфу/грунту та калібрування нейропредиктора на локальні умови (сезон, тип ґрунту, знаряддя).

## Висновки

Запропоновано нейрокоординатор синхронної роботи «трактор–знаряддя», який поєднує планування покриття поля з онлайн-узгодженням швидкісних режимів та станів виконавчих систем, орієнтуючись на зменшення буксування, перекриттів і питомих витрат пального.

Архітектура враховує обмеження CTIS, навіски та осьових навантажень і використовує передбачення рельєфу/грунту для завчасних корекцій — що є ключовим для стабільної роботи на змінному рельєфі.

Результати моделювання та початкові польові перевірки підтверджують потенціал підходу для підвищення ефективності та якості виконання технологічних операцій; подальша робота — розширення датасетів, доменно-адаптивне навчання та інтеграція з цифровими близнюками господарств.

## Література

1. Макаренко М. Г., Бондаренко В. О. Використання інтелектуальних систем керування стійкістю та тяговим контролем автомобіля. // Матеріали XX міжнародного форуму молоді «Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті» 04-05. 04. 2024. Харків : ДБТУ, 2024 С. 154.

2. Макаренко М.Г., Калашник Є.А. Роль інформаційних технологій у вдосконаленні функціональних можливостей блочно-модульних тракторів. // Технічний прогрес в АПВ: матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 21-22 травня 2024 року / Державний біотехнологічний університет. Харків, 2024. С. 67-68.

3. Макаренко М. Г, Пиріжок В. І. Використання штучного інтелекту у вбудованих системах сільськогосподарських тракторів. // Матеріали XX

міжнародного форуму молоді «Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті» 04-05. 04. 2024. Харків: ДБТУ, 2024 С. 192.

4. Bekker M. G. Theory of Land Locomotion: The Mechanics of Vehicle Mobility. — Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1969.

5. Wong J. Y. Theory of Ground Vehicles. — 4th ed. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.

6. ASABE Standards. Agricultural Machinery Management Data (D497). — St. Joseph (MI): ASABE, (ост. ред.).

7. Oksanen T., Visala A. Coverage path planning algorithms for agricultural field machines // Journal of Field Robotics. — 2009. — 26(8). — С. 651–668.

8. Bochtis D., Vougioukas S. Minimising the non-working distance travelled by machines operating in a headland field pattern // Biosystems Engineering. — 2008. — 101(1). — С. 1–12.

9. ISO 11783. Tractors and machinery for agriculture and forestry — Serial control and communications data network (ISOBUS). — Geneva: ISO, (чинне вид.).

**УДК 656.13.066:004.8:502.175**

## **AI-ESCO-ROUTING: ЗМЕНШЕННЯ ВИТРАТ ПАЛЬНОГО Й ВИКИДІВ З УРАХУВАННЯМ ТРАФІКУ ТА РЕЛЬЄФУ**

**Манойло Володимир Максимович**, докт. техн. наук, професор каф. ДВЗ,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,  
e-mail: volodimir.m.manoylo@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2208-4404

**Макаренко Микола Григорович**, доцент каф. «Трактори і автомобілі»,  
Державний біотехнологічний університет,  
e-mail: mak\_nk@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4078-9045

**Шевченко Ігор Олександрович**, канд. техн. наук, доцент, завідувач каф.  
«Трактори і автомобілі», Державний біотехнологічний університет,  
e-mail: igorshvchnk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1280-5290

Традиційні навігаційні системи здебільшого мінімізують час у дорозі, ігноруючи мікродинаміку «старт-стоп» і рельєф, що на практиці підвищує реальні витрати пального та викиди, особливо в заторах і на підйомах [1, 9]. AI-esco-routing пропонує альтернативу: обирати маршрут з урахуванням динаміки трафіку та ухилів/мікрорельєфу, мінімізуючи паливо й викиди при контрольованій затримці [1, 8].

Ключовою вимогою є ETA (Estimated Time of Arrival) як жорстке або ймовірнісне обмеження: маршрут повинен дотриматися дедлайну (або забезпечити високий рівень довіри до прибуття вчасно), зважаючи на стохастичність трафіку [7]. ETA (Estimated Time of Arrival) у нашому формулюванні виступає жорсткою або ймовірнісною вимогою: маршрут має забезпечувати прибуття не пізніше заданого дедлайну (або з високою довірою, наприклад, у 95-му перцентилі часу) за умов стохастичних коливань трафіку