

НЕЙРОПРОГНОЗ БУКСУВАННЯ І КЕРУВАННЯ БАЛАСТУВАННЯМ ТРАКТОРА НА ЗМІННОМУ РЕЛЬЄФІ

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

Щербінський Ігор Олександрович, аспірант,
Державний біотехнологічний університет,
e-mail: ihor.shcherbinskyi@claas.com

Експлуатація колісних тракторів у змінних польових умовах характеризується значною варіабельністю властивостей ґрунту (вологість, щільність, структурність), рельєфу (ухил, мікрорельєф), навантаження на ходову систему та режимів агрегаткування. Надлишкове буксування призводить до перевитрат пального, прискореного зносу шин, падіння продуктивності та небажаного ущільнення ґрунту. Класичні підходи терамеханіки й емпіричні рівняння (Беккер, Вонг, Бриксіус тощо) дають корисні орієнтири, але потребують важкодоступних параметрів і не завжди встигають адаптуватися до швидких змін у полі [1–7]. Паралельно, системи централізованого регулювання тиску в шинах (CTIS) та гнучкі схеми баластування на практиці часто застосовуються «за довідкою», без урахування поточної сцени. Це мотивує створення швидких нейромоделей прогнозу буксування та предиктивного керування баластуванням/тиском для підвищення тягової ефективності з одночасним зменшенням енерговитрат і впливу на ґрунт [5–9].

Мета — розробити і валідувати нейромережевий пристрій миттєвого буксування трактора на змінному рельєфі та синтезувати предиктивний алгоритм (MPC) керування баластуванням і/або тиском у шинах, який мінімізує буксування, питомі витрати пального і середній контактний тиск.

Об'єкт дослідження: колісний трактор із навісними/причіпними знаряддями (плуг, культиватор, сівалка), робота на різних типах ґрунтів і ухилів (до 8°). Дані/сенсорика: J1939-телематика (крутний момент, частота обертання, передача, витрата пального), швидкість та траєкторія (GNSS/RTK), ухил і вібрації (IMU), швидкість коліс, тягове зусилля на дишлі/тягловому брусі (тензодатчики), CTIS (тиск по колесах, швидкість зміни тиску), довкілля (температура, вологість), вибіркові пенетрометричні вимірювання; рельєф — з цифрової моделі висот і локальної агромапи.

Формальні співвідношення: буксування $\delta = (\omega R - v)/(\omega R)$, тяговий ККД $\eta_{TE} = P_{drawbar} / P_{engine}$. Керуючі дії змінюють нормальні реакції коліс і середній контактний тиск, що впливають на зсувні/нормальні напруження в плямі контакту [1–7].

Архітектура моделі: мультимодальний темпоральний предиктор (LSTM/Temporal-Transformer) із вектором x_t (режими ДВЗ/трансмисії, швидкість, ухил, мікрорельєф, ознаки ґрунту, поточний тиск у шинах, конфігурація баласту, параметри знаряддя). Вихід — прогноз \hat{s}_{t+1} і довірчий інтервал.

Фізична узгодженість: регуляризації на монотонність (у робочій зоні N), штраф за порушення енергетичних меж, інваріантність до масштабування каналів. Навчання/валідація: розбиття за полями/сезонами («leave-field-out»), калібрування на підмножині, перевірка на невідомих ділянках. Метрики: RMSE/MAE по δ , R^2 , стабільність прогнозу при розривах сигналів.

Предиктивне керування (MPC) на горизонті N мінімізується:

$$J = w_1 \sum \delta_t + w_2 \sum \bar{p}_{\text{contact}}(u_t) + w_3 \sum \hat{q}_{\text{fuel}}(u_t), \quad (1)$$

де u_t — дії (перерозподіл/вибір конфігурації баласту; цільові p_{tire} для CTIS; параметри навіски).

Обмеження: $p_{\text{min}} \leq p_{\text{tire}} \leq p_{\text{max}}$, швидкість зміни тиску/мас, допустимі осьові навантаження/габарити, технологічні обмеження знаряддя, вимоги безпеки на ухилах. База для порівняння: фіксований довідковий тиск; статичний баласт «за таблицями»; емпіричні правила оператора.

Предиктивне керування (Model Predictive Control або MPC) — це підхід, у якому контролер на кожному кроці спрогнозує поведінку об'єкта на полі N_p , оптимізує послідовність керувань з урахуванням обмежень, застосовує перший крок u_t^* та повторює процес зі зміною рельєфу.

Модель об'єкта $x_{t+1} = f(x_t, u_t)$, $y_t = g(x_t)$.

У роботі використовується даними-орієнтована нейромодель f_θ з фізичними регуляризаціями.

Обмеження $p_{\text{min}} \leq p_{\text{tire}} \leq p_{\text{max}}$; $|\Delta p_{\text{tire}}/\Delta t| \leq (CTIS)_{\text{max}}$; допустимі осьові навантаження; обмеження стійкості на схилах; технологічні вимоги знаряддя.

Model Predictive Control — це керування «із поглядом у майбутнє». Воно планує дії наперед, зважаючи на рельєф, властивості ґрунту й обмеження техніки. У нашій задачі це критично з трьох причин: передбачення рельєфу та умов попереду; багатоканальність і узгодження виконавців; «вшиті» інженерні обмеження. MPC отримує від GNSS/RTK і цифрової моделі висот інформацію про ухили та мікрорельєф наперед по траєкторії. Завдяки цьому система встигає завчасно підготувати трактор до складних ділянок: плавно знизити тиск у шинах на підході до підйому чи вологого ґрунту, а після проходження — так само плавно повернути тиск до транспортного режиму. Це зменшує пікове буксування, покращує зчеплення та економить паливо.

Багатоканальність і узгодження виконавців одночасно торкається трьох важелів впливу: системи тиску в шинах (CTIS), розподілу баласту між осями, параметрів навіски.

МРС уміє координувати ці канали разом. Наприклад, на поперечному ухилі він може трохи знизити тиск на ведучій осі, утримати достатню нормальну реакцію на керованій осі, а навискою стабілізувати курс і глибину роботи зняряддя. При цьому МРС автоматично врівноважує цілі: менше буксування, менший тиск на ґрунт, нижча витрата пального, стабільний рух.

МРС природно працює із межами: мінімальний/максимальний тиск у шинах, швидкість його зміни, допустимі осьові навантаження, вимоги стійкості на схилі, межі й швидкість налаштування навіски, дискретність/повільність зміни баласту. Якщо всі вимоги одночасно виконати неможливо, МРС використовує акуратні «пом'якшення» з великим штрафом, аби рішення лишалося безпечним і технічно здійсненним.

Керування враховує наступні параметри.

Стан машини та ґрунтові умови: швидкість і стабільність руху, ухил і мікрорельєф, орієнтовна вологість/щільність ґрунту (з сенсорів і карт), поточний тиск у шинах, конфігурація баласту, тип і налаштування зняряддя.

Керування: цільові тиски в шинах (по осях або навіть по колесах), частку баласту на передній/задній осі (або вибір із доступних конфігурацій), параметри навіски (щоб впливати на розподіл навантажень і курсову стійкість).

Модель поведінки: швидкий предиктор, який за поточними даними оцінює, яким буде буксування при різних комбінаціях тиску, баласту та налаштувань. Поряд із цим використовуються пристрої визначення витрати пального та середнього тиску на ґрунт — щоб керування не шкодило агрофізиці.

На практиці система зчитує сенсори та картографічну інформацію попереду по траєкторії. Перебирає допустимі сценарії дій (тиск, баласт, навіска) на кілька секунд уперед і обирає найкращий план, який зменшує буксування та контактний тиск і не порушує обмежень. Далі виконує перший крок цього плану (наприклад, починає плавно знижувати тиск на ведучій осі), знову зчитує дані — і повторює планування з оновленою інформацією. Такий підхід робить поведінку системи адаптивною до реальних змін у полі. Результат: менші піки буксування, рівніший рух, нижчий середній тиск на ґрунт.

В цілому дана нейромодель стабільно узагальнює залежності між режимами руху, рельєфом і властивостями ґрунту, відтворюючи відомі тренди терамеханіки (зростання буксування при зменшенні нормального навантаження та/або підвищенні тиску в шинах на слабких ґрунтах) [2–5]. На контрольних ділянках похибки прогнозу достатні для використання в замкненій МРС-петлі. Порівняно з базовими стратегіями, предиктивне керування рекомендує нижчі значення p_{tire} у зонах із підвищеною вологістю та/або на малих швидкостях тягового режиму, а також динамічний перерозподіл баласту між осями при русі на схилах. На виробничих проходах це зумовлює зменшення середнього буксування, питомих витрат пального на гектар і розрахункового середнього контактного тиску. Відзначено покращення курсової стійкості агрегату на поперечних ухилах, що узгоджується з висновками класичних моделей і випробувань [5–7, 9, 10].

Практична реалізація: система працює в двох режимах — автономному (за наявності СТІС/активного баласту/електрогідравліки навіски) і рекомендаційному (генерація карт цільових тисків і конфігурацій баласту для ділянок поля) з інтеграцією у термінал прецизійного землеробства.

Висновки

Запропоновано фізично-узгоджений нейропредиктор буксування та МРС-алгоритм керування баластуванням/тиском у шинах, придатні для роботи в реальному часі на змінному рельєфі.

Порівняно з базовими стратегіями, система забезпечує стале зменшення буксування і розрахункового контактного тиску з одночасним зниженням питомих витрат пального, узгоджене з класичною терамеханікою та сучасними емпіричними моделями [5–8].

Архітектура легко інтегрується з наявною телематикою J1939 і СТІС; за відсутності виконавчих систем працює як рекомендаційний модуль (карти тиску/баласту для зон поля).

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. Brixius W. W. Traction Prediction Equations for Tractors Using Bias Ply Tires. — St. Joseph (MI): American Society of Agricultural Engineers, 1987. — (ASAE Paper No. 87-1622).

7. Wismer R. D., Luth H. J. Off-Road Traction Prediction for Wheeled Vehicles // Journal of Terramechanics. — 1973. — Vol. 10, No. 2. — P. 49–61.

8. János Z., Hanamoto B. Analytical Determination of Drawbar Pull as a Function of Slip for Tracked Vehicles // Proc. 1st Int. Conf. on the Mechanics of Soil-Vehicle Systems. — Turin, 1961.

9. OECD Tractor Codes. Standard Code for the Official Testing of Agricultural and Forestry Tractor Performance (Code 2). — Paris: OECD, (ост. вид.).

10. ASABE Standards. Agricultural Machinery Management Data (D497). — St. Joseph (MI): ASABE).

УДК 629.33:656.07

ОЦІНКА ПОТРЕБИ В ЗАПАСНИХ ЧАСТИНАХ ЯК ЕЛЕМЕНТ РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

Москалюк Микола Леонідович, аспірант, кафедра автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: moskalyuk255@gmail.com, ORCID: [0009-0002-4660-8858](https://orcid.org/0009-0002-4660-8858)

Кашканов Андрій Альбертович, д.т.н., професор, кафедра автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: a.kashkanov@vntu.edu.ua, ORCID: [0000-0003-3294-6135](https://orcid.org/0000-0003-3294-6135)

Сучасне забезпечення запасними частинами автомобільного транспорту (АТ) стає стратегічно важливим напрямом управління, який визначає не лише безперебійність руху, а й загальну ефективність роботи автопарків та імідж компаній на ринку [1]. В умовах стрімкої цифровізації, поширення IoT-рішень і впровадження штучного інтелекту для прогнозування технічного стану транспортних засобів [2] управління запасами виходить на новий рівень складності та відповідальності.

Розвиток інтелектуальних транспортних систем та екотехнологій підвищує вимоги до екологічної безпеки й оптимізації викидів у процесі експлуатації. У цьому контексті забезпечення запасними частинами інтегрується з концепціями циркулярної економіки: застосуванням відновлених компонентів, реалізацією зворотної логістики та використанням 3D-друку для оперативного відтворення критичних деталей прямо на місці експлуатації [3].

Сучасні підходи до оцінки потреби в запасних частинах поєднують:

– прогнозу аналітику на основі машинного навчання для раннього виявлення потенційних відмов [4];

– цифрові двійники транспортних засобів, які моделюють ресурс кожного вузла з урахуванням стилю водіння та умов експлуатації [5];

– блокчейн-платформи для забезпечення прозорості ланцюжків постачання та підтвердження сертифікації запчастин [6];

– адаптивні системи управління запасами, що поєднують практики Just-In-Time та мінімальної безпечної політики запасів (safety stock) [7].

Ефективна організація технічного обслуговування і ремонту (ТОiP) ґрунтується на інтегрованих інформаційних платформах, які об'єднують дані