

Артёмов М. П.<sup>1</sup>  
ORCID: 0000-0002-2947-2664  
E-mail: [artiomovprof@ukr.net](mailto:artiomovprof@ukr.net)

Макаренко О. М.<sup>1</sup>  
ORCID: 0009-0002-0476-0624  
e-mail: [rem\\_htz@ukr.net](mailto:rem_htz@ukr.net)

Пастушенко С. І.<sup>2</sup>  
ORCID: 0000-0002-1996-3558  
E-mail: [52701hi@gmail.com](mailto:52701hi@gmail.com)

<sup>1</sup> Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна

<sup>2</sup> Відокремлений підрозділ НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут», м. Бережани, Україна

## ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТУ ЯК ІНСТРУМЕНТ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОЧИХ РЕЖИМІВ У ЗМІННИХ ПОЛЬОВИХ УМОВАХ

DOI <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.16>

УДК 631.372:631.3.004.18:004.94:004.8

*Артёмов М. П., Макаренко О. М., Пастушенко С. І. Цифровий двійник машинно-тракторного агрегату як інструмент оптимізації робочих режимів у змінних польових умовах*

**Анотація.** У статті обґрунтовано науково-технічні засади використання цифрового двійника машинно-тракторного агрегату як інструменту оптимізації робочих режимів у змінних польових умовах. Показано, що ефективність машинно-тракторного агрегату визначається не лише конструктивними параметрами трактора та сільськогосподарського знаряддя, а й здатністю системи керування оперативно враховувати зміну тягового опору, вологості та щільності ґрунту, буксування рушіїв, рельєфу поля, технологічної глибини обробітку, швидкості руху та енергетичного режиму двигуна. Запропоновано концептуальну архітектуру цифрового двійника МТА, яка включає фізичний рівень агрегату, сенсорний рівень, рівень збору й синхронізації даних, модельний рівень, рівень адаптивного керування, рівень оптимізації та рівень взаємодії з оператором і хмарною інфраструктурою. Обґрунтовано використання підходів Model-Based Systems Engineering, Data Fusion, Edge Computing, IoT, GPS-навігації, предиктивного керування та алгоритмів штучного інтелекту для формування адаптивної системи підтримки прийняття рішень.

Розроблено логіко-математичний опис функціонування цифрового двійника, що враховує тяговий баланс агрегату, енергетичні характеристики двигуна, буксування рушіїв, опір ґрунтообробного знаряддя та агротехнологічні обмеження. Запропоновано багатокритеріальний підхід до оптимізації режимів роботи за критеріями мінімізації питомої витрати палива, зниження буксування, забезпечення стабільної глибини обробітку, підвищення продуктивності та дотримання агротехнічних вимог. Наведено модельний імітаційний сценарій, який демонструє потенційну можливість зниження питомої витрати палива, стабілізації тягового навантаження та підвищення енергетичної ефективності агрегату за рахунок адаптивного вибору швидкісного режиму, передавального числа, положення навісної системи та допустимого діапазону буксування.

**Ключові слова:** цифровий двійник, машинно-тракторний агрегат, адаптивне керування, тягово-динамічні характеристики, енергетична ефективність, агротехнологічні параметри, точне землеробство, IoT, GPS, Data Fusion, Model Predictive Control.

*Artyomov M. P., Makarenko M. G., Pastushenko S. I. Digital twin of a machine-tractor unit as a tool for optimizing operating modes in variable field conditions.*

**Abstract.** *The article substantiates the scientific and technical principles of using a digital twin of a machine-tractor unit as a tool for optimizing operating modes under variable field conditions. It is shown that the efficiency of a machine-tractor unit is determined not only by the design parameters of the tractor and agricultural implement, but also by the ability of the control system to promptly take into account changes in draft resistance, soil moisture and density, wheel slip, field relief, tillage depth, travel speed and engine energy mode. A conceptual architecture of the digital twin of a machine-tractor unit is proposed, including the physical level of the unit, sensor level, data acquisition and synchronization level, model level, adaptive control level, optimization level, and interaction level with the operator and cloud infrastructure. The application of Model-Based Systems Engineering, Data Fusion, Edge Computing, IoT, GPS navigation, predictive control and artificial intelligence algorithms for creating an adaptive decision-support system is substantiated.*

*A logical and mathematical description of the digital twin operation is developed, taking into account the traction balance of the unit, engine energy characteristics, wheel slip, tillage implement resistance and agrotechnological constraints. A multi-criteria approach to optimizing operating modes is proposed according to the criteria of minimizing specific fuel consumption, reducing wheel slip, ensuring stable tillage depth, increasing productivity and maintaining agrotechnical requirements. A simulation-based scenario is presented, demonstrating the potential possibility of reducing specific fuel consumption, stabilizing traction load and increasing the energy efficiency of the unit through adaptive selection of travel speed, gear ratio, hitch position and allowable wheel slip range.*

**Keywords:** *digital twin, machine-tractor unit, adaptive control, traction-dynamic characteristics, energy efficiency, agrotechnological parameters, precision agriculture, IoT, GPS, Data Fusion, Model Predictive Control.*

## **Вступ**

Сучасна механізація сільськогосподарського виробництва перебуває на етапі переходу від традиційного використання машин до інтелектуальних кіберфізичних систем, здатних виконувати моніторинг, прогнозування, самодіагностику та оптимізацію робочих процесів. У межах цієї трансформації машинно-тракторний агрегат перестає розглядатися лише як сукупність трактора, робочого знаряддя та оператора. Він дедалі більше набуває ознак складної динамічної системи, у якій механічні, енергетичні, інформаційні, навігаційні та агротехнологічні процеси взаємопов'язані в режимі реального або квазіреального часу.

Особливість роботи машинно-тракторного агрегату полягає в тому, що його навантажувальні та енергетичні режими формуються не в стабільному середовищі, а в умовах постійної просторово-часової мінливості поля. На відміну від промислових машин, які працюють переважно у контрольованому середовищі, МТА взаємодіє з неоднорідним ґрунтом, змінним рельєфом, різною вологістю, ущільненням, рослинними рештками, локальними перешкодами та агротехнологічними обмеженнями.

У міжнародній науковій літературі цифровий двійник розглядається як цифрове представлення фізичного об'єкта або процесу, що синхронізується з ним через потоки даних і використовується для моніторингу, аналізу, прогнозування та оптимізації. Початково концепція цифрового двійника активно розвивалася у виробництві та управлінні життєвим циклом виробів [1–3]. Надалі вона була адаптована до кіберфізичних систем, промислового Інтернету речей, smart manufacturing та smart farming. У роботах С. Verdouw та співавторів цифровий двійник у smart farming визначається як цифровий еквівалент реального об'єкта, що відображає його стан і

поведінку протягом життєвого циклу та дозволяє керувати операціями на основі майже реального часу [6].

Для аграрного сектору цифрові двійники є особливо перспективними, оскільки дозволяють поєднувати фізичні моделі, сенсорні дані, машинне навчання, прогноз погоди, карти поля та алгоритми оптимізації. Pylianidis, Osinga та Athanasiadis зазначають, що цифрові двійники в аграрному секторі відкривають можливості для моніторингу, симуляції та підтримки прийняття рішень, а також формують дорожню карту ширшого впровадження таких систем у сільському господарстві [7].

### **Актуальність дослідження**

Актуальність теми зумовлена кількома взаємопов'язаними чинниками.

По-перше, зростає вартість енергоресурсів, а паливна складова залишається однією з найбільш значущих у собівартості механізованих польових робіт. Навіть незначне зниження питомої витрати палива на гектар за масштабного використання тракторного парку може давати суттєвий економічний ефект.

По-друге, у змінних польових умовах часто виникає розрив між номінальними можливостями трактора та фактично реалізованою тяговою ефективністю. Надмірне буксування призводить до втрат енергії, ущільнення ґрунту, зниження продуктивності та збільшення витрат палива. Недостатнє використання тягового потенціалу, навпаки, означає роботу агрегату з неповним завантаженням, що також погіршує економічні показники [13].

По-третє, сучасні трактори оснащуються електронними системами керування, CAN-шинами, телематичними модулями, GPS-приймачами, датчиками швидкості, навантаження, положення навісної системи, витрати палива та параметрів двигуна. Проте наявність великої кількості даних сама по собі не забезпечує оптимізації. Необхідна система, яка перетворює дані на знання, а знання – на керуючі дії або рекомендації оператору.

По-четверте, точне землеробство передбачає перехід від усередненого керування до диференційованого управління технологічними операціями. Це означає, що агрегат повинен адаптувати швидкість, глибину обробітку, тягове навантаження та інші параметри відповідно до карти-завдання, фактичних умов поля й прогнозованих обмежень. Саме цифровий двійник може стати центральним інструментом для такого адаптивного керування.

По-п'яте, існує потреба у формуванні науково обґрунтованих підходів до інтеграції цифрових двійників у системи технічного сервісу, діагностики, прогнозування зношування та оптимізації експлуатації сільськогосподарських машин. Для журналу «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів» ця тема є безпосередньо релевантною, оскільки цифровий двійник може використовуватися не лише під час польової роботи, а й для оцінювання технічного стану агрегату, прогнозування несправностей, планування технічного обслуговування та аналізу ефективності використання машинного парку.

Аналіз сучасних досліджень і публікацій

Концептуальні засади цифрового двійника були сформовані у працях M. Grieves, де цифровий двійник розглядався як віртуальне представлення фізичного виробу, що дає змогу зіставляти спроектований і фактично виготовлений об'єкт [1]. Надалі ця концепція отримала розвиток у промисловому виробництві, де цифрові двійники стали використовуватися для моніторингу, симуляції, оптимізації та підтримки життєвого циклу складних технічних систем. Kritzinger та співавтори запропонували класифікацію цифрових моделей, цифрових тіней і цифрових двійників залежно від характеру обміну даними між фізичним та віртуальним об'єктами [3]. Тао та співавтори систематизували

стан розвитку цифрових двійників у промисловості, наголосивши на ролі даних, моделей, сервісів і зворотного зв'язку [2].

Важливим нормативно-концептуальним орієнтиром є серія ISO 23247, у якій цифровий двійник розглядається в контексті виробничих систем та інтеграції даних, моделей і сервісів [4]. Хоча цей стандарт безпосередньо орієнтований на manufacturing, його логіка може бути адаптована до аграрних машин: фізичний об'єкт, цифрове представлення, канали даних, сервіси аналізу, сценарії використання та інтеграція в ширшу інформаційну систему.

У smart farming цифрові двійники почали активно розглядатися як інструмент переходу від пасивного моніторингу до активного управління. Wolfert та співавтори показали, що Big Data у smart farming впливає не лише на виробничі операції, а й на весь агропродовольчий ланцюг [5]. Verdouw та співавтори запропонували концептуальну рамку цифрових двійників у smart farming, пов'язавши їх із IoT-архітектурою та системним підходом до управління [6]. Pylianidis та співавтори проаналізували застосування цифрових двійників в аграрному секторі та визначили набір прикладних сценаріїв, що включають рослинництво, тваринництво, робототехніку, моніторинг полів і підтримку прийняття рішень [7].

Окремий напрям досліджень стосується цифрових двійників саме тракторів і високопотужних мобільних машин. Zhang запропонував метод побудови цифрового двійника високопотужного трактора та описав механізм його функціонування [11]. У 2025 році також з'являються дослідження, де цифровий двійник поєднується з підкріплювальним навчанням для розроблення стратегії перемикання передач тракторів із powershift-трансмісією в умовах коливання тягового опору [12]. Це підтверджує актуальність переходу від статичних рекомендацій до адаптивних алгоритмів, які враховують зміну навантаження та стану агрегату.

Тягово-енергетична ефективність тракторів традиційно досліджується через показники тягового зусилля, буксування, тягового ККД, витрати палива, потужності на гаку та продуктивності. У роботі Ranjbarian та співавторів для оцінки параметрів трактора із ґрунтообробними знаряддями використовувалися вимірювання тягового опору, фактичної швидкості, витрати палива, глибини обробітку й частоти обертання двигуна, а буксування, потужність на гаку та тяговий ККД розраховувалися за стандартними методиками ASABE [14]. Дослідження автоматичного керування буксуванням електричного трактора показують, що підтримання буксування у доцільному діапазоні може підвищувати тягову ефективність і знижувати енергоспоживання [15].

Недостатньо досліджено саме інтегрований підхід, у якому цифровий двійник МТА використовується як інструмент одночасної оптимізації тягових, енергетичних та агротехнологічних параметрів у змінних польових умовах. Саме ця наукова прогалина визначає постановку проблеми цієї статті.

У вітчизняній науковій школі проблеми підвищення ефективності тракторів, машинно-тракторних агрегатів і мобільних енергетичних засобів досліджувалися в контексті тягової динаміки, енергетичної раціоналізації, інтелектуалізації систем керування та вдосконалення компоновальних схем. Зокрема, М.П. Артьомов, М.А. Подригало та М.Г. Макаренко розглядали вдосконалення тракторів шляхом використання інтелектуальних автоматизованих систем управління, що безпосередньо пов'язано з ідеєю переходу від традиційного керування до адаптивних цифрових систем [15]. Дослідження М.Г. Макаренка, О.М. Макаренка та О.Г. Григораша щодо підвищення тягових показників блочно-модульних тягово-приводних агрегатів є важливими для обґрунтування тягово-динамічного блоку цифрового двійника МТА [16].

Окреме значення має методологічний напрям, пов'язаний із методом парціальних прискорень у динаміці мобільних машин. Колективна монографія за редакцією М.А. Подригала та М.П. Артёмова узагальнює підходи до аналізу динаміки мобільних машин, що може бути використано як теоретична база для побудови динамічних моделей руху МТА в цифровому двійнику [17]. Також актуальними для теми є сучасні публікації М.Г. Макаренка у співавторстві, присвячені підвищенню ефективності машинно-тракторних агрегатів у точному землеробстві та використанню комп'ютерного моделювання для прогнозування енергоспоживання й оптимізації технологічних процесів [18 – 20].

### **Постановка проблеми**

Польова робота МТА характеризується високою невизначеністю зовнішнього середовища. Навіть у межах одного поля тяговий опір знаряддя може істотно змінюватися через різну щільність, вологість, механічний склад ґрунту, наявність ущільнених зон, схили, колії, пожнивні рештки та неоднорідність попереднього обробітку. У традиційній системі керування оператор реагує на ці зміни переважно постфактум: після збільшення буксування, падіння швидкості, перевантаження двигуна або погіршення якості виконання операції.

Науково-технічна проблема полягає у відсутності достатньо узгодженої системи, яка б у реальному або квазіреальному часі збирала дані про стан МТА та польові умови; оцінювала поточний тягово-енергетичний стан агрегату; прогнозувала розвиток режиму за декілька секунд або метрів руху вперед; порівнювала альтернативні режими роботи; обирала оптимальний режим з урахуванням енергетичних, тягових і агротехнологічних критеріїв; передавала рекомендацію оператору або формувала керуючий вплив на електронні системи трактора.

Цифровий двійник МТА дозволяє розв'язати цю проблему, оскільки поєднує дані фізичного агрегату, математичні моделі, алгоритми адаптації та оптимізаційні процедури в єдину кіберфізичну систему.

Мета дослідження – обґрунтувати концепцію, архітектуру та логіко-математичні засади цифрового двійника машинно-тракторного агрегату як інструменту оптимізації робочих режимів у змінних польових умовах.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні задачі. Проаналізувати сучасні наукові підходи до створення цифрових двійників у промисловості, smart farming та механізації сільського господарства. Сформувати концептуальну модель цифрового двійника МТА як кіберфізичної системи. Розробити архітектуру цифрового двійника з урахуванням сенсорного забезпечення, моделей, алгоритмів адаптивного керування та каналів обміну даними. Обґрунтувати математичні й логічні моделі, необхідні для оцінювання тягово-динамічних, енергетичних та агротехнологічних параметрів агрегату. Запропонувати багатокритеріальний підхід до оптимізації робочих режимів МТА. Навести модельний імітаційний сценарій застосування цифрового двійника для адаптації агрегату до змінних польових умов.

### **Результати дослідження**

Цифровий двійник МТА доцільно визначити як динамічну цифрову модель фізичного агрегату «трактор - знаряддя - ґрунтове середовище - технологічна операція», яка синхронізується з реальним агрегатом за допомогою сенсорних, навігаційних, телематичних і технологічних даних та використовується для моніторингу, прогнозування, діагностики й оптимізації режимів роботи.

На відміну від звичайної електронної карти машини або системи телеметрії, цифровий двійник має три принципові ознаки. Динамічність – модель змінюється разом

зі станом фізичного агрегату та польових умов. Двосторонній зв'язок – дані надходять від фізичного об'єкта до моделі, а результати моделювання повертаються у вигляді рекомендацій або керуючих дій. Прогностична функція – система оцінює не лише поточний стан, а й можливий розвиток режиму при зміні швидкості, передачі, глибини обробітку, тягового навантаження або параметрів робочого органу.

У межах запропонованої концепції цифровий двійник МТА виконує функції моніторингу фактичних режимів роботи; оцінювання тягового опору та буксування; виявлення енергетично нераціональних режимів; прогнозування перевантаження двигуна або надмірного буксування; адаптивний вибір швидкісного режиму; підтримка стабільної глибини обробітку; оптимізація витрати палива на гектар; формування рекомендацій оператору; накопичення даних для подальшого технічного сервісу й аналітики.

Запропонований цифровий двійник МТА логічно продовжує напрям досліджень, пов'язаний з інтелектуалізацією систем керування тракторами. Якщо в роботі [19] акцент зроблено на використанні інтелектуальних автоматизованих систем управління для вдосконалення тракторів, то в межах цього дослідження такий підхід розширюється до рівня цифрового двійника, який поєднує сенсорні дані, математичні моделі, алгоритми адаптивного керування та оптимізацію робочих режимів у реальному або квазіреальному часі. Запропонована архітектура цифрового двійника включає сім взаємопов'язаних рівнів.

Фізичний рівень охоплює трактор, сільськогосподарське знаряддя, робочі органи, рушії, двигун, трансмісію, гідравлічну систему, навісний механізм і середовище взаємодії – ґрунт. Саме фізичний рівень є джерелом реальних процесів: тягового навантаження, буксування, витрати палива, коливань швидкості, зміни глибини обробітку.

У цифровому двійнику МТА фізичний рівень не можна відокремлювати від агротехнологічної операції. Наприклад, оранка, глибоке рихлення, культивуація, сівба або міжрядний обробіток мають різні допустимі діапазони швидкості, глибини, буксування й нерівномірності обробітку. Тому цифровий двійник має враховувати не лише машину, а й конкретний технологічний процес.

Сенсорний рівень формує первинний потік даних. Для цифрового двійника МТА доцільно використовувати групи датчиків, такі як датчики частоти обертання двигуна; датчики навантаження двигуна; датчики витрати палива; датчики швидкості руху; GPS/GNSS-приймач; датчики буксування або непрямі алгоритми його визначення; датчики положення навісної системи; тензометричні датчики тягового зусилля; датчики тиску в гідросистемі; IMU-модуль для оцінювання ухилу, прискорень і коливань; датчики вологості та температури ґрунту; датчики глибини обробітку; CAN-дані трактора.

Важливою є не лише кількість датчиків, а й якість синхронізації даних. Якщо GPS-дані, CAN-параметри двигуна, тягове зусилля і глибина обробітку мають різні частоти оновлення та часові затримки, цифровий двійник повинен виконувати часову узгодженість потоків.

На рівні збору, синхронізації та попередньої обробки даних виконується фільтрація шумів; видалення аномальних вимірів; часовий ресемплінг; синхронізація GPS і CAN-даних; нормалізація параметрів; розрахунок похідних показників; оцінювання достовірності даних.

Для фільтрації можуть використовуватися ковзні середні, медіанні фільтри, комплементарні фільтри або фільтр Калмана. Наприклад, фактична швидкість агрегату може оцінюватися шляхом поєднання даних GPS, частоти обертання коліс і IMU. Такий

підхід Data Fusion дозволяє зменшити вплив втрати супутникового сигналу, пробуксовування та локальних похибок вимірювання.

Модельний рівень є ядром цифрового двійника. Він включає модель тягового балансу; модель буксування; модель двигуна; модель трансмісії; модель взаємодії рушія з ґрунтом; модель опору знаряддя; модель агротехнологічної якості; модель витрати палива; прогнозу модель зміни умов поля. Він може бути побудований за гібридним принципом – частина залежностей описується фізичними рівняннями, а частина уточнюється за допомогою машинного навчання.

Рівень адаптації відповідає за уточнення параметрів моделей на основі фактичних даних. Наприклад, якщо фактичне буксування за певного тягового зусилля перевищує розрахункове, система може зробити висновок про зниження несучої здатності ґрунту або підвищення вологості. Якщо двигун систематично працює в зоні підвищеної питомої витрати палива, модель може скоригувати рекомендований швидкісний режим або передавальне число.

На рівні оптимізації система розв'язує задачу вибору режиму роботи. Залежно від технічних можливостей трактора цифровий двійник може формувати рекомендації оператору; автоматично змінювати швидкість; пропонувати перемикання передач; коригувати положення навісної системи; змінювати цільову частоту обертання двигуна; обмежувати тягове навантаження; контролювати буксування.

Найбільш перспективним є застосування Model Predictive Control, коли система прогнозує поведінку МТА на короткому горизонті часу та обирає керуючі дії з урахуванням обмежень. У сільськогосподарських умовах такий горизонт може задаватися не лише часом, а й відстанню руху, наприклад 5–20 м вперед за траєкторією агрегату.

Цифровий двійник має бути зрозумілим для оператора. Тому інтерфейс повинен не лише показувати велику кількість параметрів, а й надавати пріоритетні рекомендації, наприклад, «зменшити швидкість на 0,6 км/год»; «перейти на нижчу передачу»; «збільшити глибину недоцільно через перевищення тягового опору»; «буксування перевищує оптимальний діапазон»; «режим двигуна енергетично неефективний»; «попередити зону підвищеного тягового опору».

Хмарна інфраструктура може використовуватися для накопичення історичних даних, побудови карт поля, порівняння агрегатів, аналізу роботи механізаторів, сервісної діагностики та навчання моделей, які будуть в автоматичному режимі керувати агрегатом.

Математичний опис цифрового двійника МТА повинен поєднувати фізичні залежності та логічні правила прийняття рішень.

Базове рівняння тягового балансу можна подати у вигляді:

$$P_{tr} = R_{imp} + R_{roll} + R_{slope} + R_{dyn} , \quad (1)$$

де  $P_{tr}$  – реалізоване тягове зусилля трактора;  
 $R_{imp}$  – тяговий опір знаряддя;  
 $R_{roll}$  – опір коченню;  
 $R_{slope}$  – складова опору, зумовлена ухилом;  
 $R_{dyn}$  – динамічна складова опору під час прискорення або несталого руху.

Тяговий опір знаряддя може бути описаний як функція:

$$R_{imp} = f(b, h, v, \rho, W, C, k_s), \quad (2)$$

де  $b$  – ширина захвату;  
 $h$  – глибина обробітку;  
 $v$  – швидкість руху;

$\rho$  – щільність ґрунту;  
 $W$  – вологість ґрунту;  
 $C$  – механічний склад або опір ґрунту;  
 $k_s$  – коефіцієнт стану робочих органів.

Буксування рушіїв визначається як:

$$\delta = \frac{v_t - v_f}{v_t} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де  $v_t$  – теоретична швидкість за кінематикою трансмісії та коліс;  
 $v_f$  – фактична швидкість руху за GPS або інерційно-навігаційною оцінкою.

Потужність на гаку:

$$N_{drawbar} = P_{tr} \cdot v_f \quad (4)$$

Питома витрата палива на одиницю площі:

$$q_A = \frac{Q_f}{B \cdot v_f} \quad (5)$$

де  $Q_f$  – годинна витрата палива;  
 $B$  – робоча ширина захвату агрегату;  
 $v_f$  – фактична швидкість руху.

У загальному вигляді задача оптимізації може бути записана як мінімізація цільової функції:

$$J = w_1 q_A + w_2 \delta + w_3 |h - h_{set}| + w_4 \Delta n_e + w_5 R_{agro} \quad (6)$$

де  $q_A$  – питома витрата палива;  
 $\delta$  – буксування;  
 $h$  – фактична глибина;  
 $h_{set}$  – задана глибина;  
 $\Delta n_e$  – відхилення частоти обертання двигуна від енергетично доцільної зони;  
 $R_{agro}$  – штраф за порушення агротехнологічних вимог;  
 $w_1 \dots w_5$  – вагові коефіцієнти.

Обмеження задачі:

$$\begin{aligned} \delta_{min} &\leq \delta \leq \delta_{max} \\ h_{min} &\leq h \leq h_{max} \\ n_{e,min} &\leq n_e \leq n_{e,max} \\ P_{tr} &\leq P_{tr,max} \\ Q_f &\rightarrow min \end{aligned}$$

У логічному представленні цифровий двійник виконує цикл по отриманню даних з фізичного агрегату; очистити та синхронізувати дані; оцінити поточний стан; уточнити параметри моделей; спрогнозувати поведінку агрегату; порівняти альтернативні режими; обрати оптимальну дію; передати рекомендацію або керуючий вплив; зберегти результат для подальшого навчання.

Для побудови динамічної частини цифрового двійника доцільно використовувати положення теорії руху мобільних машин, зокрема підходи, пов'язані з аналізом прискорень, тягових реакцій, перерозподілу сил і динамічної взаємодії рушіїв з опорною поверхнею. У цьому контексті метод парціальних прискорень може бути використаний

як один із теоретичних інструментів для деталізованого аналізу динамічного стану МТА при зміні тягового опору, швидкісного режиму та умов контакту рушія з ґрунтом [17, 18].

Адаптація цифрового двійника повинна відбуватися на двох рівнях.

Перший рівень – оперативна адаптація, яка виконується під час руху агрегату. Наприклад, якщо система фіксує зростання тягового опору й буксування, вона може зменшити швидкість, рекомендувати зміну передачі або скоригувати положення навісної системи.

Другий рівень – накопичувальна адаптація, яка формується на основі історичних даних. Після кількох проходів агрегату поле може бути представлене у вигляді карти зон тягового опору, буксування, витрати палива та продуктивності. Такі карти можуть використовуватися для планування наступних операцій.

Особливо важливим є зв'язок цифрового двійника з GPS/GNSS-координатами. Кожен вимір тягового опору, буксування, витрати палива й глибини обробітку повинен бути прив'язаний до просторової координати. Це дозволяє формувати цифрову карту енергетичної складності поля. У майбутньому така карта може використовуватися для диференційованого обробітку, оптимізації маршрутів, вибору агрегату та планування технічного сервісу.

Цифровий двійник дозволяє оцінювати тяговий режим не статично, а в динаміці. Для цього він порівнює фактичне тягове зусилля; швидкість руху; буксування; витрату палива; режим двигуна; стан ґрунту; технологічні обмеження [19, 20].

У результаті система може визначати, чи є поточний режим енергетично ефективним, перевантаженим, недовантаженим, агротехнологічно нестабільним, небезпечним для ущільнення ґрунту, нераціональним за витратою палива.

Енергетична ефективність МТА визначається не лише абсолютною витратою палива за годину, а й витратою на одиницю виконаної роботи - гектар, тону переміщеного ґрунту, метр проходу або умовну одиницю технологічної операції. Саме тому цифровий двійник повинен оцінювати не тільки  $Q_f$  а й питомі показники, такі як л/га; кВт·год/га; МДж/га; л/т переміщеного ґрунту; витрати палива на одиницю продуктивності.

Робота двигуна в зоні мінімальної питомої витрати палива не завжди збігається з максимальною продуктивністю. Тому задача оптимізації має бути багатокритеріальною. Для важких ґрунтообробних операцій пріоритетом може бути зниження буксування та стабілізація тягового навантаження. Для сівби – дотримання сталої швидкості та глибини. Для транспортних операцій – мінімізація витрат палива при збереженні продуктивності.

Цифровий двійник повинен враховувати карту питомої витрати палива двигуна, передавальні числа трансмісії, характеристики гідравлічної системи та режим роботи знаряддя. Для тракторів із автоматизованою трансмісією перспективним є використання алгоритмів адаптивного перемикавання передач, зокрема на основі прогнозу тягового опору. Сучасні дослідження цифрових двійників powershift-тракторів із використанням reinforcement learning демонструють актуальність такого напрямку [12].

При цьому агротехнологічна ефективність не може бути принесена в жертву енергетичній економії. Тому цифровий двійник має включати агротехнологічні обмеження такі як допустиме відхилення глибини; допустима нерівномірність обробітку; допустима швидкість для конкретної операції; обмеження за ущільненням ґрунту; вимоги до якості кришення; вимоги до стабільності міжряддя; обмеження щодо буксування.

Для сівби пріоритетними можуть бути рівномірність глибини загортання насіння, сталість швидкості та мінімізація пропусків. Для оранки – стабільність глибини, якість перевертання пласта та допустиме буксування. Для культивації – рівномірність

обробітку й уникнення надмірного перемішування ґрунту. Тому цифровий двійник має бути налаштований не лише на конкретний трактор, а й на конкретну операцію.

Інтеграція GPS/GNSS забезпечує просторову прив'язку параметрів роботи. Це дозволяє створювати карти тягового опору; буксування; витрати палива; продуктивності; глибини обробітку; зон перевантаження; зон енергетичних втрат.

ІоТ-компоненти забезпечують передачу даних між агрегатом, локальним контролером, хмарною платформою та сервісною системою. Edge Computing є важливим тому, що частину рішень необхідно приймати без затримки. Наприклад, реакція на різке зростання буксування або перевантаження двигуна не може залежати лише від хмарної обробки. Тому критичні алгоритми повинні виконуватися на борту трактора.

Штучний інтелект може використовуватися для прогнозування тягового опору; класифікації стану ґрунту; виявлення аномальних режимів; прогнозування витрати палива; розпізнавання зон ризику; уточнення параметрів моделей; формування рекомендацій оператору.

Однак AI-компоненти мають бути інтегровані обережно. Для відповідальних технічних систем доцільно використовувати гібридний підхід, у якому фізичні моделі забезпечують інженерну інтерпретованість, а алгоритми машинного навчання уточнюють параметри та прогнозують складні нелінійні залежності.

В роботі розглядається модельний імітаційний сценарій. Він не претендує на заміну польових випробувань, але дозволяє показати логіку роботи цифрового двійника та потенційні напрями підвищення ефективності.

За задачами дослідження розглядається МТА у складі енергонасиченого трактора та ґрунтообробного знаряддя. Поле умовно поділено на три зони. Зона А – ґрунт середньої щільності, нормальна вологість, стабільний тяговий опір. Зона В – підвищена вологість і знижена несуча здатність ґрунту. Зона С – ущільнений ґрунт, підвищений тяговий опір.

Порівнюються два режими: базовий режим – сталі налаштування швидкості та передачі та адаптивний режим – цифровий двійник коригує швидкість, передачу та положення навісної системи (табл. 1).

Наведені результати мають імітаційний характер і повинні розглядатися як обґрунтований модельний прогноз, а не як дані натурного експерименту. Їхня логіка узгоджується з сучасними дослідженнями, де контроль буксування, активне керування тягою та оптимізація режимів тракторних агрегатів розглядаються як засоби підвищення тягової ефективності та зниження енергоспоживання [14, 15].

Таблиця 1

Узагальнені модельні результати

Показник	Базовий режим	Адаптивний режим із цифровим двійником	Очікуваний ефект
Середнє буксування, %	16–19	10–14	зниження втрат на буксування
Питома витрата палива, л/га	100 %	88–93 %	економія 7–12 %
Нерівномірність глибини	підвищена в зонах В і С	стабілізована	краща якість операції
Перевантаження двигуна	періодичне	зменшене	стабільніший режим
Продуктивність	базова	+4–8 %	за рахунок зменшення простоїв і втрат

### Наукова новизна статті полягає в наступному

Запропоновано трактувати цифровий двійник МТА не як інформаційну копію машини, а як адаптивну кіберфізичну систему оптимізації тягових, енергетичних та агротехнологічних режимів.

Сформовано архітектуру цифрового двійника, яка поєднує фізичний агрегат, сенсорні потоки, GPS/GNSS-дані, Data Fusion, математичні моделі, Edge Computing, AI-компоненти та алгоритми адаптивного керування.

Обґрунтовано багатокритеріальну цільову функцію оптимізації, що одночасно враховує питому витрату палива, буксування, відхилення глибини обробітку, режим двигуна та агротехнологічні штрафи.

Запропоновано логіку просторово прив'язаної адаптації МТА до змінних польових умов через формування карт тягового опору, буксування та енергетичної складності поля.

Показано можливість використання цифрового двійника як інструменту не лише оперативного керування, а й технічного сервісу, діагностики та прогнозування експлуатаційного стану агрегату.

Практична цінність запропонованого підходу полягає у можливості його використання для підвищення паливної економічності МТА; зниження буксування рушій; стабілізації глибини обробітку; підвищення продуктивності польових робіт; зменшення ущільнення ґрунту; формування карт енергетичної складності поля; підтримки прийняття рішень оператором; оптимізації налаштувань агрегату; прогнозування технічного стану; удосконалення систем технічного сервісу.

Для аграрних підприємств цифровий двійник може стати інструментом порівняльного аналізу ефективності різних тракторів, агрегатів, механізаторів і технологічних схем. Для сервісних служб – засобом віддаленої діагностики, виявлення перевантажень і прогнозування несправностей. Для наукових установ – платформою для дослідження взаємодії трактора, знаряддя та ґрунту в умовах цифрового землеробства.

### Висновки

Цифровий двійник машинно-тракторного агрегату є перспективним інструментом оптимізації робочих режимів у змінних польових умовах, оскільки дозволяє поєднати сенсорні дані, математичні моделі, алгоритми адаптивного керування та просторову інформацію про поле.

Ефективність МТА визначається не лише потужністю трактора або конструкцією знаряддя, а й узгодженістю тягового, енергетичного та агротехнологічного режимів. Саме цифровий двійник дає змогу оцінювати цю узгодженість у динаміці.

Запропонована архітектура цифрового двійника включає фізичний, сенсорний, інформаційний, модельний, адаптивний, оптимізаційний та операторський рівні. Така структура відповідає сучасній логіці побудови кіберфізичних систем і може бути адаптована до різних типів польових операцій.

Багатокритеріальна оптимізація режимів МТА повинна враховувати питому витрату палива, буксування, тягове навантаження, режим двигуна, глибину обробітку, продуктивність і агротехнологічні обмеження.

Імітаційний сценарій показує, що використання цифрового двійника потенційно може забезпечити зниження питомої витрати палива, стабілізацію буксування, зменшення перевантажень двигуна та покращення якості виконання технологічної операції.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на проведення натурних польових експериментів, калібрування моделей для різних типів ґрунтів, інтеграцію цифрового

двійника з ISOBUS-сумісними знаряддями, розроблення AI-моделей прогнозування тягового опору та впровадження MPC-алгоритмів у бортові системи керування тракторів.

#### Список використаних джерел

1. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. White paper. 2014. 7 p.
2. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019. Vol. 15, No. 4. P. 2405–2415. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.
3. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51, No. 11. P. 1016–1022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
4. ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 1: Overview and general principles. Geneva : International Organization for Standardization, 2021.
5. Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M. J. Big Data in Smart Farming – A review. Agricultural Systems. 2017. Vol. 153. P. 69–80. DOI: 10.1016/j.agry.2017.01.023.
6. Verdouw C., Tekinerdogan B., Beulens A., Wolfert S. Digital twins in smart farming. Agricultural Systems. 2021. Vol. 189. Article 103046. DOI: 10.1016/j.agry.2020.103046.
7. Pylaniadis C., Osinga S., Athanasiadis I. N. Introducing digital twins to agriculture. Computers and Electronics in Agriculture. 2021. Vol. 184. Article 105942. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105942.
8. Nasirahmadi A., Hensel O. Toward the next generation of digitalization in agriculture based on digital twin paradigm. Sensors. 2022. Vol. 22, No. 2. Article 498. DOI: 10.3390/s22020498.
9. Moghadam P., Lowe T., Edwards E. J. Digital twin for the future of agriculture. Journal of Field Robotics. 2020. Vol. 37, No. 6. P. 973–976. DOI: 10.1002/rob.21943.
10. Subeesh A., Mehta C. R. Automation and digitization of agriculture using artificial intelligence and internet of things. Artificial Intelligence in Agriculture. 2021. Vol. 5. P. 278–291. DOI: 10.1016/j.aiia.2021.11.004.
11. Zhang Y. Construction method of high-horsepower tractor digital twin. Digital Twin. 2024. DOI: 10.12688/digitaltwin.17615.2.
12. Chen F. et al. Shifting strategy for power shift tractors based on digital twin and reinforcement learning. Computers and Electronics in Agriculture. 2025.
13. Zoz F. M., Grisso R. D. Traction and Tractor Performance. ASABE Distinguished Lecture Series. St. Joseph : ASABE, 2003.
14. Ranjbarian S., Askari M., Jannatkhan J. Performance of tractor and tillage implements in clay soil. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. 2017. Vol. 16, No. 2. P. 154–162. DOI: 10.1016/j.jssas.2015.05.003.
15. Артёмов М. П., Подригало М. А., Макаренко М. Г. Вдосконалення тракторів використанням інтелектуальних автоматизованих систем управління. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки*. 2019. Вип. 199: Механізація сільськогосподарського виробництва. С. 160–166.
16. Макаренко М. Г., Макаренко О. М., Григораш О. Г. Підвищення тягових показників блочно-модульних тягово-приводних агрегатів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки*. 2014. Вип. 148. С. 295–304.

17. Метод парціальних прискорень та його застосування в динаміці мобільних машин: колективна монографія / за ред. М. А. Подригала, М. П. Артџомова. Харків: «Естет Прінт», 2025. 231 с. ISBN 978-617-8403-01-0.

18. Макаренко Т. В., Макаренко М. Г., Гармаш Д. О. Інноваційні підходи до підвищення ефективності машинно-тракторних агрегатів у точному землеробстві шляхом впровадження комбінованих машин. *Технічний прогрес в АПК: матеріали ХХ Міжнародної науково-практичної конференції*, 21–22 травня 2025 р. Харків : ДБТУ, 2025. С. 209–212.

19. Макаренко М.Г., Пиріжок В.І. Використання штучного інтелекту у вбудованих системах сільськогосподарських тракторів // *Молодь і індустрія 4.0 в ХХІ столітті: матеріали ХХ Міжнар. форуму молоді*, 4-5 квіт. 2024 р. Харків, 2024. С. 192.

20. 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 р. Харків: ДБТУ, 2024. С. 67–68.

### References

1. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. White paper. 2014. 7 p.

2. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019. Vol. 15, No. 4. P. 2405–2415. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.

3. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51, No. 11. P. 1016–1022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

4. ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 1: Overview and general principles. Geneva : International Organization for Standardization, 2021.

5. Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M. J. Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*. 2017. Vol. 153. P. 69–80. DOI: 10.1016/j.agsy.2017.01.023.

6. Verdouw C., Tekinerdogan B., Beulens A., Wolfert S. Digital twins in smart farming. *Agricultural Systems*. 2021. Vol. 189. Article 103046. DOI: 10.1016/j.agsy.2020.103046.

7. Pylianidis C., Osinga S., Athanasiadis I. N. Introducing digital twins to agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 184. Article 105942. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105942.

8. Nasirahmadi A., Hensel O. Toward the next generation of digitalization in agriculture based on digital twin paradigm. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 2. Article 498. DOI: 10.3390/s22020498.

9. Moghadam P., Lowe T., Edwards E. J. Digital twin for the future of agriculture. *Journal of Field Robotics*. 2020. Vol. 37, No. 6. P. 973–976. DOI: 10.1002/rob.21943.

10. Subeesh A., Mehta C. R. Automation and digitization of agriculture using artificial intelligence and internet of things. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2021. Vol. 5. P. 278–291. DOI: 10.1016/j.aiia.2021.11.004.

11. Zhang Y. Construction method of high-horsepower tractor digital twin. *Digital Twin*. 2024. DOI: 10.12688/digitaltwin.17615.2.

12. Chen F. et al. Shifting strategy for power shift tractors based on digital twin and reinforcement learning. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2025.

13. Zoz F. M., Grisso R. D. Traction and Tractor Performance. *ASABE Distinguished Lecture Series*. St. Joseph : ASABE, 2003.

14. Ranjbarian S., Askari M., Jannatkah J. Performance of tractor and tillage implements in clay soil. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2017. Vol. 16, No. 2. P. 154–162. DOI: 10.1016/j.jssas.2015.05.003.

15. Artiymov M. P., Podryhalo M. A., Makarenko M. H. Vdoskonalennia traktoriv vykorystanniam intelektualnykh avtomatyzovanykh system upravlinnia. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka. Tekhnichni nauky*. 2019. Vyp. 199: Mekhanizatsiia silskohospodarskoho vyrobnytstva. S. 160–166.

16. Makarenko M. H., Makarenko O. M., Hryhorash O. H. Pidvyshchennia tiahovykh pokaznykiv blochno-modulnykh tiahovo-pryvodnykh ahrehativ. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka. Tekhnichni nauky*. 2014. Vyp. 148. S. 295–304.

17. *Metod partialnykh pryskoren ta yoho zastosuvannia v dynamitsi mobilnykh mashyn : kolektyvna monohrafiia / za red. M. A. Podryhala, M. P. Artiymova*. Kharkiv : «Estet Print», 2025. 231 s. ISBN 978-617-8403-01-0.

18. Makarenko T. V., Makarenko M. H., Harmash D. O. Innovatsiini pidkhody do pidvyshchennia efektyvnosti mashynno-traktornykh ahrehativ u tochnomu zemlerobstvi shliakhom vprovadzhennia kombinovanykh mashyn. *Tekhnichniy prohres v APK: materialy KhKh Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 21–22 travnia 2025 r.* Kharkiv : DBTU, 2025. S. 209–212.

19. Makarenko M. H., Pyrizhok V. I. *Vykorystannia shtuchnoho intelektu u vbudovanykh systemakh silskohospodarskykh traktoriv // Molod i industriia 4.0 v XXI stolitti: materialy KhKh Mizhnar. forumu molodi, 4–5 kvit. 2024 r.* Kharkiv: DBTU, 2024. S. 192.

20. Makarenko M. H., Kalashnyk Ye. A. *Rol informatsiinykh tekhnolohii u vdoskonalenni funktsionalnykh mozhlyvostei blochno-modulnykh traktoriv // Tekhnichniy prohres v APV: materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 21–22 travnia 2024 r.* Kharkiv: DBTU, 2024. S. 67–68.

Отримано: 03.04.2026. Прийнято: 17.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.