

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКА ТЕХНІКА ТА ОБЛАДНАННЯ: ПРОГНОЗУВАННЯ, КОНСТРУЮВАННЯ, ВИПРОБУВАННЯ

УДК 631.37-076

[http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-1-30\(44\)-1](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-1-30(44)-1)

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНЮВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ЯКОСТЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ТРАКТОРІВ

Лебедев А., д-р техн. наук, проф.,

e-mail: tiaxntusg@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1975-3323>

Державний біотехнологічний університет,

Лебедев С., канд. техн. наук,

e-mail: hfukrndipvt@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3067-5135>,

Коробко А., канд. техн. наук, доц., провідний науковий співробітник,

e-mail: ak82andrey@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6618-7790>

Харківська філія УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого

Анотація

Мета дослідження. Формування методології системного оцінювання експлуатаційних якостей сільськогосподарських тракторів.

Методи дослідження. Методологічною основою роботи з оцінювання експлуатаційних якостей сільськогосподарських тракторів є Кодекс 2 ОЕСР, який нормує методики їхніх випробувань. Визначення тягових показників тракторів виконується методом, регламентованим СОУ УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого 71.2-37-046043090-017:2015 із застосуванням вимірально-реєстраційного комплексу. Під час оцінювання функційної точності трактора аналізуються показники згідно з ДСТУ 7463:2013, які визначають тяговий клас трактора, енергетичні можливості і агрегатованість. Для формування наукової проблеми, визначення мети і постановки задач дослідження використовується аналітичний метод та порівняльний аналіз із результатами експериментальних досліджень.

Результати дослідження. Результати досліджень спрямовані на розвиток методології системного підходу оцінювання експлуатаційних властивостей сільськогосподарських тракторів у напрямку підвищення їхніх техніко-економічних і агротехнічних властивостей. Запропоновані нові залежності, які базуються на методі парціальних прискорень, оцінювання тягового-енергетичних показників трактора, його керованості та стійкості руху, гальмівних властивостей. Обґрунтована методика оцінювання динамічних властивостей трактора у складі ґрунтообробного агрегата під час несталого режиму його руху на гоні. Кодекс 2 ОЕСР нормує методологію випробувань сільськогосподарських тракторів щодо оцінювання їхніх експлуатаційних якостей за номінального технічного стану. Результатами досліджень, наведеними у цій статті, доведено, що відхилення реальних функційних параметрів від номінальних істотно впливають на експлуатаційні якості трактора. Необхідно виконання наукових досліджень у цьому напрямку.

Висновок. За результатами проведених досліджень виконана класифікація експлуатаційних якостей сільськогосподарських тракторів за їхніми тяговими та агротехнічними властивостями. Результати досліджень дали змогу сформулювати основні теоретичні та науково-практичні висновки. Сформульована методологія системного підходу до оцінювання експлуатаційних якостей сільськогосподарського трактора, на основі обґрунтованого методу парціальних прискорень, яка базується на розв'язанні зворотної задачі динаміки: за відомого прискорення оцінюються сили, які діють. На основі методу парціальних прискорень обґрунтовані залежності ефективної потужності двигуна, ККД трактора, маси і опору агрегатованої з трактором сільгоспмашини, гальмівні властивості трактора, його керованість та стійкість руху на гоні під час виконання технологічної операції. Аналітично до-

ведено і експериментально підтверджено нестабільність сили тяги трактора, опору сільгоспмашини ґрунтообробного агрегата, динамічні показники яких перевищують середні значення в 2,5-3,0 рази.

Ключові слова: трактор, системний підхід, експлуатаційні якості, тягові властивості, керованість, гальмівні властивості.

Вступ. Системний підхід – це напрямок методології наукового пізнання, в основі якого лежить дослідження об'єктів як система умов їхнього функціонування. Підвищення продуктивності праці в аграрному секторі пов'язано з необхідністю наукового обґрунтування оцінки експлуатаційних якостей сільськогосподарських тракторів. Одним із способів вирішення цієї задачі є системний аналіз експлуатаційних властивостей тракторів [Селиванов, 2010] під час виконання різних технологічних операцій. Запропоновано [Мигаль, 2001] системний підхід для оцінювання загальнотехнічних властивостей трактора віброакустичними методами, якими оцінюється його надійність. Ці методи ефективні для забезпечення і підвищення безвідмовності, рівня використання та готовності тракторів до польових робіт.

Проте віброакустичні методи не знайшли поширення в ході оцінювання експлуатаційних якостей трактора під час виконання технологічної операції. Кодекс 2 ОЕСР (Організація економічного співробітництва та розвитку) [Кодекс, 2016] нормує методологію випробувань сільськогосподарських тракторів щодо оцінювання їхніх експлуатаційних якостей, до яких віднесені показники потужності, паливна економічність двигуна і трактора, керованість трактора, гальмівні властивості та прохідність.

Багато країн, які не є членами ОЕСР, зокрема Україна, частково або повністю використовують Кодекси для випробувань, проведення тендерів або регулювання питання імпорту тракторів. У цьому напрямку виконано ряд наукових робіт у Харківській філії УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого [Лебедев, 2017; Лебедев, 2021], які покладені в основу дослідження технологічної адаптації тракторів. За таких умов, трактор, за аналогією із суміжними областями техніки [Уемов, 1987], розглядається як «Система з безліччю елементів, певним чином взаємопов'язаних, і які

утворюють певну цілість, єдність». Одночасно у відомих публікаціях [Тракторы, 1981] зазначається, що системний підхід зараз не існує як методологічна концепція підвищення експлуатаційних якостей сільськогосподарських тракторів. Подібні задачі, наприклад, в автомобілебудуванні, ефективно вирішуються на основі інформації про прискорення руху автомобіля [Oppenheim, 1999; Sergienko, 2011]. Не заперечуючи справедливості твердження про можливість вдосконалення конструкції автомобіля за інформацією щодо його прискорення, необхідно відзначити неможливість їх використання під час оцінювання експлуатаційних якостей трактора, оскільки потужність двигуна автомобіля реалізується через швидкість його руху, трактора – через тягу на гаку.

Постановка завдань. Для тракторів під час оцінювання їхніх тягових властивостей, керованості та стійкості руху, гальмівних властивостей, які є основою їхніх експлуатаційних якостей [Кодекс, 2016], ефективним є метод парціальних прискорень [Метод, 2012], який базується на рішенні зворотної задачі динаміки: за відомого прискорення оцінюються сили, які діють. Одночасно необхідно відзначити, що оцінити експлуатаційні властивості трактора не завжди можна за силами, які діють, наприклад енергетичні показники тракторного агрегата. Для розв'язання цієї проблеми необхідне розроблення нових методик визначення тягового ККД трактора під час агрегування з сільгоспмашиною, ефективної потужності двигуна, оцінки керованості та стійкості руху тракторного агрегата [Кваліметрія, 2018].

Практика ставить перед наукою необхідність розв'язання проблем системного підходу щодо оцінювання експлуатаційних якостей сільськогосподарських тракторів.

З огляду на вищесказане, метою дослідження є формування методології

системного оцінювання експлуатаційних якостей сільськогосподарських тракторів.

Методи і матеріали. Методологічною основою роботи з оцінювання експлуатаційних якостей сільськогосподарських тракторів є Кодекс 2 ОЕСР [Кодекс, 2016], який нормує методики їх випробувань. Визначення тягових показників тракторів виконується методом, який регламентований СОУ УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого 71.2-37-046043090-017:2015 із застосуванням вимірювально-реєстраційного комплексу. Указаний метод і вимірювально-реєстраційний комплекс розроблені за участі авторів цієї статті [Метод, 2012; Кваліметрія, 2018]. Під час оцінювання функційної точності трактора аналізуються, згідно з ДСТУ 7463:2013 [ДСТУ, 2013], показники, які визначають тяговий клас трактора, енергетичні можливості та агрегатованість. Для формування наукової проблеми, визначення мети і постановки задач дослідження використовується аналітичний метод та порівняльний аналіз із результатами експериментальних досліджень.

Результати. Системний підхід щодо оцінювання експлуатаційних властивостей тракторів направлений на підвищення їхніх споживчих властивостей, які характеризуються сукупністю техніко-економічних, агротехнічних, загальнотехнічних властивостей, а також властивостей, які направлені на забезпечення охорони праці, безпеки і захисту навколишнього середовища. Споживчі властивості трактора взаємопов'язані з його якістю. Взявши за основу міжнародний стандарт ДСТУ ISO 9000:2015 [ДСТУ, 2015], сформулюємо поняття властивість і якість трактора.

Властивість характеризує будь-яку одну сторону, виявлену у взаєминах з такою самою стороною іншого трактора. Наприклад, стійкість руху на схилах трактора гірської модифікації вища за стійкість трактора рівнинної модифікації того ж класу.

Якість – це сукупність властивостей трактора, які відрізняють його від іншої моделі. Наприклад, продуктивність трактора з колісною формулою 4К4 вища продуктивності трактора 4К2.

Техніко-економічні та агротехнічні властивості сільськогосподарського трактора, згідно з Кодексом 2 ОЕСР, є основою його експлуатаційних якостей [Кодекс, 2016] (рис. 1).

Аналіз експлуатаційних якостей і властивостей трактора показує, що його техніко-економічні показники базуються, здебільшого, на швидкісному режимі роботи, прискоренні під час розгону і вибігу (вимкнена муфта зчеплення, нейтральна передача трансмісії).

Авторами цієї статті доведено [Кваліметрія, 2018], що під час виконання агрегатом певної технологічної операції ефективну потужність двигуна можна оцінити за залежністю

$$N_e(V) = P_T V_{ar} = (m_T + m_{cm})V[\dot{V}_{ar}(V) - \dot{V}_{arv}(V)], \quad (1)$$

де P_T – тягове зусилля на тягових колесах;
 V_{ar} – швидкість агрегата;

$\dot{V}_{ar}(V)$, $\dot{V}_{arv}(V)$ – прискорення агрегата під час розгону і вибігу;

m_T , m_{cm} – маса трактора і сільгоспмашини.

Потужність на гаку трактора визначається за залежністю

$$N_{гk}(V) = P_{гk} V_{ar} = m_{ar} V_{ar} \left[\dot{V}_{тf}(V) - \left(1 + \frac{m_{cm}}{m_{ar}} \right) \dot{V}_{arv}(V) \right]. \quad (2)$$

де $P_{гk}$ – тягове зусилля на гаку;

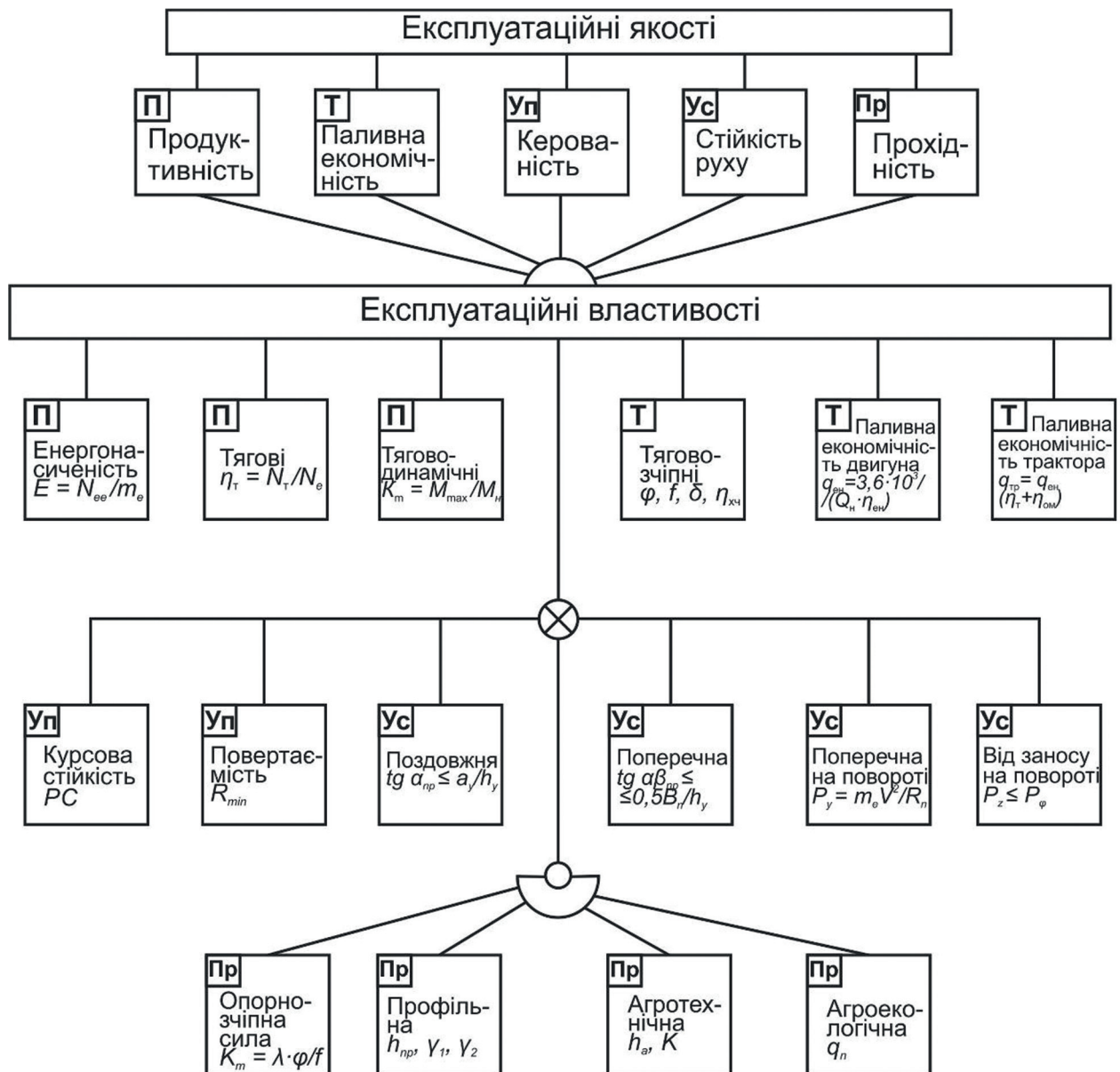
$\dot{V}_{тf}(V)$ – прискорення трактора за дії лише опору коченню на колесах;

m_{ar} – маса агрегата, приведена до поступально-рухомих частин.

За співвідношенням $N_{гk}(V)$ та $N_e(V)$ оцінюється тяговий ККД трактора

$$\eta_T(V) = \frac{N_{гk}(V)}{N_e(V)} = \frac{\dot{V}_T^f(V)}{1 + \frac{m_{cm}}{m_T}} - \dot{V}_T^B(V) \quad (3)$$

$$= \frac{\dot{V}_T^f(V)}{\dot{V}_T(V) - \dot{V}_T^B(V)}.$$



N_e, m_e - експлуатаційна потужність двигуна, маса трактора;
 η_T - умовний тяговий ККД трактора, N_T - тягова потужність трактора,
 N_e - ефективна потужність двигуна; K_m - коефіцієнт запасу крутного моменту двигуна;
 M_{max}, M_n - максимальний, номінальний крутний момент;
 $\phi, f, \delta, \eta_{хч}$ - коефіцієнт зчеплення, опору кочення, буксування, ККД ходової системи;
 $q_{ен}$ - номінальна питома витрата палива двигуном; Q_n - витрата палива;
 $\eta_{ен}$ - ККД двигуна; $q_{тр}$ - питома витрата палива трактора; $\eta_{ом}$ - ККД відбору потужності;
 PC - розвал та сходження керованих коліс; R_{min} - мінімальний радіус повороту;
 $\alpha_{пр}$ - кут підйому; a_y, h_y - координати центру тяжіння; P_y - поперечна відцентрова сила;
 V, R - швидкість і радіус повороту; P_z - сила заносу на повороті; P_ϕ - сила зчеплення;
 $h_{пр}$ - дорожній просвіт; γ_1, γ_2 - кути переднього і заднього звисів;
 h_a - агротехнічний просвіт; K - захисна зона; q_n - тиск рушіїв на ґрунт;
 Експлуатаційні якості позначені індексами **П, Т, Уп, Ус, Пр**; індекси експлуатаційних властивостей відображають взаємозв'язок з експлуатаційною якістю

Рисунок 1 - Графічна апроксимація моделей для конвертації FGCC в NDVI (зліва) та NDVI в FGCC (справа) для зернобобових культур

Прискорення $\dot{V}_T(V)$, $\dot{V}_T^B(V)$, $\dot{V}_T^f(V)$ визначаються вимірювально-реєстраційним комплексом на основі лінійних акселерометрів [Кваліметрія, 2018].

Для оцінювання за рівняннями (1), (2) і (3) потужності двигуна, потужності на гаку трактора та його тягового ККД під час виконання технологічного процесу необхідно визначити масу трактора, агрегатованої сільгоспмашини та її сили опору. Авторами цієї статі сформульовані нові способи визначення маси та опору сільгоспмашини.

Сутність способів:

- маса сільгоспмашин під час агрегування з трактором визначається за прискоренням вибігу (вимкнена муфта зчеплення, нейтральна передача) на певному ґрунтовому фоні, наприклад, на ґрунтовій дорозі, до повної зупинки трактора із сільгоспмашиною та без неї за однакової швидкості початку вибігу;

- сила опору сільгоспмашини в агрегуванні з трактором визначається з урахуванням маси трактора і сільгоспмашини за різницею поздовжніх прискорень розгону на певному ґрунтовому фоні трактора із сільгоспмашиною в транспортному та робочому положеннях.

Виконання тракторним агрегатом (ТА) технологічної операції пов'язане з витратами енергії, яка безпосередньо витрачається на виконання технологічної операції та на динамічні процеси, які виникають у системі «трактор-сільськогосподарське знаряддя». Це положення підтверджене під час випробувань ґрунтообробного агрегата у складі трактора New Holland T8.390 і дискового лушильника ДЛМ-8,0 під час лушення стерні озимої пшениці (рис. 2), яке виконувалось у Харківській філії УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого

Лушильник ДЛМ-8,0 має ширину захвату 8,25 м, що забезпечує якісне лушення на глибину оброблення (3-14) см за швидкості руху 12-20 км/год.

Тягово-енергетичні показники агрегата New Holland T8.390 + ДЛМ-8,0 визначили під час лушення стерні озимої пшениці:

- потужність двигуна, яку можна реалізувати під час виконання технологічної операції $N_n^d = 140,69-93,84$ кВт;

- тягова потужність трактора, зумовлена його зчіпними властивостями $N_{кр}^p = 194,25-299,7$ кВт;

- швидкість агрегата, за якої можна досягти максимальної тягової потужності $V_{N_{кр}^{max}} = 6,27$ км/год.;

- максимальна можлива тягова потужність, яку реалізує трактор $N_{кр}^{max} = 169,71$ кВт;

- тяговий ККД трактора під час роботи $\eta_T^{max} = 0,59$;

- питома потужність, необхідна для роботи лушильника $N_{уд} = 12,63$ кВт;

- оптимальний тяговий опір лушильника $R_{аз} = 58,85$ кН;

- раціональна швидкість роботи агрегата $V_{рац} = 10,32$ км/год.;

- необхідна потужність для роботи агрегата зі швидкістю $V_{рац}$ – $N_{аз} = 168,7$ кВт;

- коефіцієнт використання максимальної тягової потужності трактора $\eta_{тп} = 0,98$.



Рисунок 2 – Загальний вигляд ґрунтообробного агрегата New Holland T8.390 + ДЛМ-8,0

Тракторний агрегат (маса $m_{ар}$) з урахуванням витрат енергії в системі «трактор-знаряддя» є автономною динамічною системою, основні зовнішні впливи на яку призводять до зміни сил опору руху ΣP_c і зміни кількості енергії, яка використовується на переміщення.

Ці дії, як правило, викликають зміну

швидкості V_{ar} поступального руху агрегата під дією сили тяги трактора $P_{тр}$, яка характеризується рівнянням [Коденко, 1969]:

$$\frac{dV_{ar}}{dt} = \frac{P_T - \sum P_c}{m_{ar}} \quad (4)$$

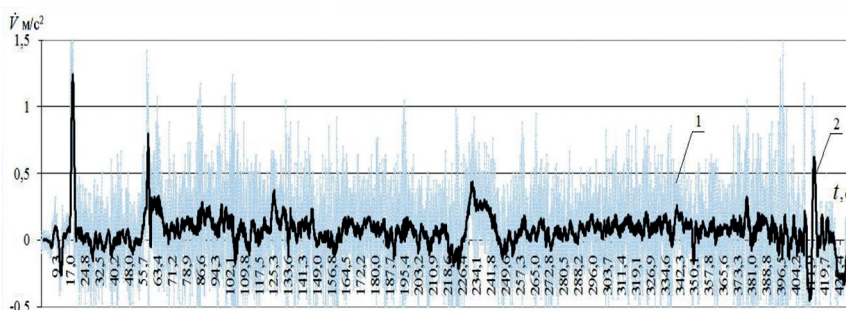
У класичній механіці відповідно до рівняння (4) оцінюється несталий рух системи, тобто $dV_{ar}/dt \neq 0$ за $P_T \neq \sum P_c$.

Сила опору сільськогосподарського знаряддя, яке входить до складу машинно-тракторного агрегата, є складною функцією, яке залежить від багатьох факторів та визначає умови роботи тракторного агрегата або його робочих органів, взаємодії робочих органів з ґрунтом та багато інших особливостей технологічних процесів за нормального функціонування тракторного агрегата. Зазначені фактори мають стохастичну природу і тому силові характеристики важко визначити в аналітичному вигляді. Актуальним завданням є визначення та контроль силових характеристик тракторного агрегата за відомими (результат експериментальних вимірювань) кінематичними характеристиками (прискорення) (рис. 3).

Для розв'язання цієї задачі пропонується використовувати підхід, відомий під назвою «метод парціальних прискорень» [Метод, 2012].

Система рівнянь компонент парціальних прискорень може бути записана, лінеаризована і представлена так:

$$\begin{aligned} \Delta a_x &= -\Delta_2 \ddot{\psi}_1 + \Delta_1 \dot{\psi}_1^2 \\ \Delta a_y &= -\Delta_1 \ddot{\psi}_1 - \Delta_2 \dot{\psi}_1^2 \end{aligned} \quad (5)$$



1 – масив даних динаміки прискорень;
2 – відфільтрований сигнал

Рисунок 3 – Графік зміни прискорення ґрунтообробного агрегата New Holland T 8.390+ДЛМ-8,0

для використання у розв'язанні якої введені позначення

$$\begin{aligned} \Delta a_x &= a_{x1} - a_{x2}; \\ \Delta a_y &= a_{y1} - a_{y2}; \\ \Delta_1 &= \rho_2 \cos \alpha_2 - \rho_1 \cos \alpha_1; \\ \Delta_2 &= \rho_2 \sin \alpha_2 + \rho_1 \sin \alpha_1. \end{aligned}$$

Складаючи систему рівнянь (5) припускалось, що $\sin \psi_1 \approx \psi_1$, $\cos \psi_1 \approx 1$. Початкове розв'язання зазначеної проблеми розглянуто під час дослідження тракторного агрегата як двомасової моделі (трактор і сільськогосподарське ґрунтообробне знаряддя) динамічної системи з чотирма степенями вільності.

У цьому випадку рушійна сила T агрегата та опору сільськогосподарського знаряддя R записуються так:

$$\begin{aligned} T &= (m_1 + m_2)a_{x1} + \frac{m_1(b_2^2 + \rho_2^2) + m_2\rho_2^2}{\gamma(b_2^2 + \rho_2^2 - b_2l)} a_{y1} + \\ &+ \Delta a_x \left[(m_1 + m_2)D_1 + \frac{m_1(b_2^2 + \rho_2^2) + m_2\rho_2^2}{\gamma(b_2^2 + \rho_2^2 - b_2l)} D_2 \right] + \\ &+ \Delta a_y \left[-\frac{m_1(b_2^2 + \rho_2^2)(D_1 - b_1D_3) + \rho_2^2 m_2 D_1}{\gamma(b_2^2 + \rho_2^2 - b_2l)} - (m_1 + m_2)D_2 \right] + \\ &+ (\psi_1 - \psi_2) \frac{b_2 D}{\gamma(b_2^2 + \rho_2^2 - b_2l)} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = |R_x| \sqrt{1 + \gamma^2} = \frac{\sqrt{1 + \gamma^2(b_2^2 + \rho_2^2)}}{\gamma(b_2^2 + \rho_2^2 - b_2l)} (\psi_1 - \psi_2) \frac{Db_2}{b_2^2 + \rho_2^2} + \\ &+ a_{y1} \left(m_1 + \frac{\rho_2^2}{b_2^2 + \rho_2^2} m_2 \right) + \Delta a_x \left(m_1(D_2 - b_1D_3) + m_2 \frac{\rho_2^2 D_2}{b_2^2 + \rho_2^2} \right) + \\ &+ \Delta a_y (m_1(D_1 - b_1D_4) + m_2 D_1) \end{aligned} \quad (7)$$

де γ – коефіцієнт пропорційності, який урахує кінематичні параметри;

R_x і R_y – складові сили опору сільськогосподарського знаряддя.

Отриманими формулами (6), (7) були розраховані сили тяги трактора і сили опору сільськогосподарського знаряддя як функції часу (рис. 4).

На рисунку 4 зображено розраховані статичні T_a^{cm} , R_{az}^{cm} та динамічні T_a^d , R_{az}^d за запропонованим методом моделювання парціальних прискорень. Побудовані гра-

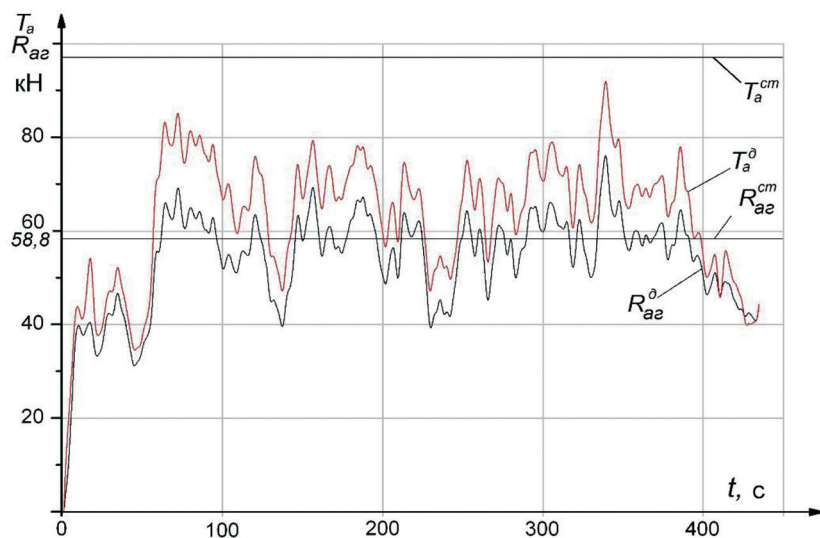


Рисунок 4 – Динаміка сили тяги трактора і сили опору знаряддя ґрунтообробного агрегата New Holland T 8.390+ ДЛМ-8,0

фіки підтверджують коливання сили опору ґрунтообробного знаряддя на всій довжині гону. Амплітуда коливання R_{az}^{δ} є в межах від 32 кН до 76 кН, тоді як розрахована за статичними даними дорівнює 58,85 кН. Динаміка сили тяги, яка необхідна на виконання технологічної операції T_a^{δ} , змінюється від 35 кН до 97 кН, що менше розрахованої за статичними даними $T_a^{cm} = 99,4$ кН.

Аналіз проведених розрахунків і побудованих за їхніми результатами графіків доводить можливість ефективного контролю потужності, силових характеристик трактора і сільськогосподарської машини у складі машинно-тракторного агрегата за несталого режиму роботи. Визначено, що в разі роботи трактора із силою тяги в межах $T_a^{\delta} = 55-82$ кН для дискування це є оптимальний варіант роботи комплектованого агрегата, а під час зменшення цього показника нижче $T_a^{\delta} \leq 55$ кН відбувається втрата працездатності ґрунтообробного агрегата. Із розрахованим запасом сили тяги, який перевищує силу опору знаряддя, ґрунтообробний агрегат працює без перевантаження.

Метод парціальний прискорень [Метод, 2012; Klets, 2013] ефективний під час оцінювання керованості трактора [Shulyak, 2016], віднесеною за Кодексом 2 ОЕСР [Кодекс, 2016] до експлуатаційних

якостей трактора (рис. 1). Керованість трактора характеризує його властивість реагувати на дії оператора, спрямовані на зберігання або зміну напрямку руху. Керівний вплив спричиняє перехідний процес з одного стану рівноваги трактора в інший, який супроводжується зміною швидкості його руху. Прискорення, які виникають за таких умов, характеризують не лише керованість трактора, а й зміну його технічного стану, обумовлену нестабільністю параметрів.

Для оцінювання керованості трактора на перехідних (несталих) режимах повороту введено поняття коефіцієнта керованості K_k , який дорівнює відношенню повертального моменту до моменту опору повороту за постійної маси трактора:

$$K_k = \frac{P_k}{\sum P_{cn}} = \frac{\dot{V}_k^n}{\dot{V}_c^n}, \quad (8)$$

де P_k – керівний вплив;

$\sum P_{cn}$ – сума всіх сил опору виходу трактора зі стану рівноваги;

$\dot{V}_k = P_k / m$, $\dot{V}_c^n = \sum P_{cn} / m$ – парціальне керівне прискорення і сила опору повороту;

m – маса трактора.

Передатна функція керування трактора за швидкості руху V буде такою:

$$W_n = 1 - \frac{1}{K_k} - \frac{V}{m} \cdot \frac{dm/dt}{\dot{V}_k}. \quad (9)$$

Трактор з ідеальною керованістю повинен мати передатну функцію керування, яка дорівнює одиниці. Отримати $W_n = 1$ неможливо, оскільки не можна отримати $K_k = \infty$. За $W_n > 1$ трактор втрачає стійкість, а за $K_k < 1$ або $W_n < 0$ – втрачає керованість. Змінні K_k та W_n у процесі експлуатації характеризують технічний стан рульового керування трактора.

Керованість та стійкість руху трактора, які характеризують його експлуатаційні

якості, є експлуатаційними властивостями трактора (рис. 1). Кодекс 2 ОЕСР [Кодекс, 2016] відносить до експлуатаційних якостей трактора також його гальмівні властивості, які визначаються за показниками сталого уповільнення і середнього уповільнення, які розраховуються за формулами:

$$d_m = \left[\frac{V_b^2 - V_e^2}{2(S_e - S_b)} \right], \quad (10)$$

$$f = V^2/2S, \quad (11)$$

де d_m – стале уповільнення, м/с²;

V_b, V_e – швидкості трактора відповідно за $0,8V_i$ і $0,1V_i$, м/с;

S_e, S_b – відстані, пройдені між V_i і V_e , м;

V_i – початкова швидкість трактора (повинна бути $\geq 98\%$ від рекомендованої швидкості на випробуваннях);

f – середнє уповільнення, м/с²;

V – початкова швидкість, м/с;

S – гальмівний шлях, м.

Згідно з розробленою в ХФ УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого методикою, проведення дорожніх випробувань тракторів серії ХТЗ-170 щодо оцінювання його гальмівних властивостей запропоновано експрес-метод оцінювання гальмівних властивостей трактора, математична модель (узагальнена) якого записана так [Кваліметрія, 2018]:

$$j_{уст}; \alpha; \psi; \Delta P_{T1}; \Delta P_{T2}; \psi = \iint_t j dt; \sigma; v, \quad (12)$$

де $j_{уст}$ – усталене сповільнення, м/с²;

α – кут нахилу прямої наростання уповільнення;

$\Delta P_{T1}, \Delta P_{T2}$ – бортова нерівномірність гальмівних сил на колесах передньої і задньої осі, Н;

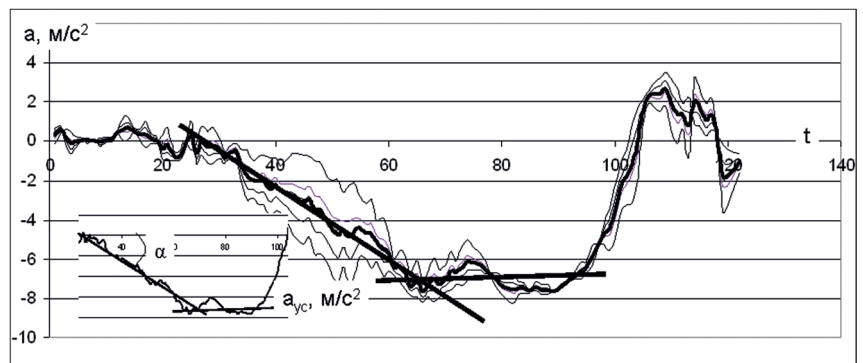
ψ – кут відхилення подовжньої осі машини;

t – час виконання гальмування, с;

σ, v – середньоквадратичне відхилення і коефіцієнт варіації показників, які визначаються, відповідно.

Основою вимірювального устаткування лінійного прискорення є реєстраційно-вимірювальний комплекс, який базується на використанні датчиків (акселерометрів), які вимірюють прискорення [Метод, 2012].

Отримані гальмівні діаграми (рис. 5) розділяються на ділянки: наростання уповільнення, стале уповільнення, зниження уповільнення. Кожна ділянка апроксимується відповідною кривою.



α – темп наростання уповільнення; α_{yc} – усталене середнє уповільнення

Рисунок 5 – Гальмівні діаграми трактора

Для визначення темпу наростання уповільнення вимірювальним комплексом фіксується момент часу початку наростання уповільнення і момент часу його переходу в усталену фазу. Отримані криві зміни уповільнень у процесі його наростання апроксимуються прямою лінією і розраховується темп наростання уповільнення щодо його збільшення Δj за час наростання до часу наростання Δt .

Кут відхилення подовжньої осі трактора в кінці гальмування ψ розраховується інтегруванням за часом значень кутової швидкості трактора в площині опорної поверхні під час гальмування (табл. 1).

Експрес-метод оцінювання гальмівних властивостей трактора, який базується на методі парціальних прискорень, дає змогу прискорено оцінити ефективність гальмування трактора.

Обговорення. Результати досліджень

Таблиця 1 – Результати нормування запропонованих гальмівний показників тракторів загального призначення

Показник	Середнє значення	Середньоквадратичне відхилення	Коефіцієнт варіації, %
Темп наростання сповільнення, м/с ³	2,5	0,32	12,6
Кут відхилення поздовжньої осі	1,4	0,15	13,6

спрямовані на розвиток методології системного підходу оцінювання експлуатаційних властивостей сільськогосподарських тракторів у напрямку підвищення їхніх техніко-економічних і агротехнічних властивостей. Запропоновані нові залежності, які базуються на методі парціальних прискорень, оцінювання тягового-енергетичних показників трактора, його керованості та стійкості руху, гальмівних властивостей. Обґрунтована методика оцінювання динамічних властивостей трактора у складі ґрунтообробного агрегата під час несталого режиму його руху на гоні. Запропоновані методи є ефективними у випробуваннях машин перемінної маси, вимірювальний комплекс може застосовуватись під час досліджень вібраційних процесів сільськогосподарських машин та дослідження їхньої стійкості [Artemov, 2015; Ovsyannikov, 2018; Shulyak, 2015; Shulyak, 2016].

Одночасно необхідно відзначити недостатню кількість наукових робіт за методологією вимірювання точності функціонування трактора, наприклад, під час оцінювання його експлуатаційних якостей. Під час оцінювання функційної точності трактора за ДСТУ 7463:2013 [ДСТУ, 2013] прийняті показники, які визначають тяговий клас трактора, енергетичні можливості та агрегатованість. У цьому випадку відповідно до ДСТУ 2860-94 [ДСТУ, 1994] трактор буде функційно стійким, за якого значення усіх параметрів, які характеризують його спроможність виконувати задані функції, відповідно до вимог нормативної і технічної документації.

Пропонується оцінювати контрольований функційний параметр x трактора за залежністю

$$x = x(S, S_{ik}, \dots, S_{nk}, x_{ik}, \dots, x_{nk}, \Delta q_i, \dots, \Delta q_n), \quad (13)$$

де S, S_{ik}, \dots, S_{nk} – функційний параметр трактора (тягове зусилля, швидкість руху) та його елементів (двигун, трансмісія, тощо);

x_{ik}, \dots, x_{nk} – відхилення реальних параметрів трактора від номінальних;

$\Delta q_i, \dots, \Delta q_n$ – відхилення реальних параметрів елементів трактора від номінальних.

Беручи за функційну точність трактора, наприклад, під час оцінювання його експлуатаційних якостей, здатність виконувати задані функції з певним ступенем близькості до ідеальної моделі, функційна похибка трактора за x, x_n поточних і номінальних значеннях функційних параметрів оцінюється за залежністю $\Delta x = x - x_n$. Трактор під час контролю буде справним, якщо кожен з його функційних параметрів, які характеризують експлуатаційні якості перебуває в межах працездатності (a, b) $a < x < b$.

Кодекс 2 ОЕСР [Кодекс, 2016] нормує методологію випробувань сільськогосподарських тракторів щодо оцінювання їхніх експлуатаційних якостей за номінального технічного стану. Результатами досліджень, які наведені у цій статті, доведено, що відхилення реальних функційних параметрів від номінальних істотно впливають на експлуатаційні якості трактора. Необхідно виконання наукових досліджень у цьому напрямку.

Висновки. За результатами проведених досліджень виконана класифікація експлуатаційних якостей сільськогосподарських тракторів за їхніми тяговими та агротехнічними властивостями. Результати досліджень дали змогу сформулювати основні теоретичні та науково-практичні висновки.

Сформульована методологія системного підходу до оцінювання експлуатаційних якостей сільськогосподарського трактора, на основі обґрунтованого методу парціальних прискорень, який базується на розв'язанні зворотної задачі динаміки: за відомого

прискорення оцінюються сили, які діють.

На основі методу парціальних прискорень обґрунтовані залежності ефективної потужності двигуна, ККД трактора, маси та опору агрегатованої з трактором сільгоспмашини, гальмівні властивості трактора, його керованість та стійкість руху на гоні під час виконання технологічної операції.

Аналітично доведено і експериментально підтверджено нестабільність сили тяги трактора, опору сільгоспмашини ґрунтообробного агрегата, динамічні показники яких перевищують середні значення в 2,5-3,0 рази.

Відкритим залишається питання оцінювання точності експлуатаційних якостей трактора, оскільки відомі нормативні документи щодо випробувань тракторів базуються на їхньому номінальному технічному стані. Результатами дослідження, наведені в цій статті, доведено, що відхилення реальних функційних параметрів від номінальних істотно впливають на експлуатаційні якості трактора. Необхідно виконання наукових досліджень у цьому напрямку.

Перелік літератури

Артемов Н. П., Лебедев А. Т., Подригало М. А. и др. (2012). Метод парциальных ускорений и его приложения в динамике мобильных машин / Под ред. Подригало М. А. Харьков : Миськдрук. 219 с.

ДСТУ ISO 9000:2015. Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів (ISO 9000:2015, IDT) (2015). Київ, 2015. 19 с. (Національний стандарт України).

ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України, 1994. – 36 с. (Національний стандарт України).

ДСТУ 7463:2013. Сільськогосподарська техніка. Трактори сільськогосподарські. Класифікація показників. К., 2013. 11 с. (Національний стандарт України).

Коденко М. Н., Лебедев А. Т. (1969). Автоматизация тракторных агрегатов. М.: Машиностроение. 196 с.

Кодекс стандартов Организаций экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) (2016) «Испытания эксплуата-

ционных качеств сельскохозяйственных тракторов» (официальный перевод) : информационное издание. М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2016. 104 с.

Лебедев А. Т., Лебедев С. А., Коробко А. І. (2018). Кваліметрія та метрологічне забезпечення випробувань тракторів. Під ред. А. Т. Лебедева. Харків: Вид-во «Міськдрук». 394 с.

Лебедев А., Лебедев С. (2021) Технологічна адаптація тракторів загального призначення. Техніка і технології АПК. № 4 (121). С. 17–21.

Лебедев С., Коробко А., Козлов Ю. (2017) Розроблення експрес-методів і технічних засобів оцінювання якості тракторів і вузлів сільськогосподарської техніки. Техніка і технології АПК. № 8. С. 33–39.

Мигаль В. Д. (2001) Системный подход к оценке качества тракторов. Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. № 7. С. 73–86.

Селиванов Н. И. (2008) Эффективное использование энергонасыщенных тракторов. Краснояр. гос. аграр. ун-т. 229 с.

Тракторы (1981) Проектирование, конструирование и расчет. Ксеневич И. П., Гуськов В. В., Бочаров Н. Ф. и др.; под общ. ред. Ксеневича И. П. М.: Машиностроение. 544 с.

Уемов А. И. (1978) Системный подход и общая теория систем. Мысль. 272 с.

Artemov N. P. & Shulyak M. L. (2015). Analysis and control of random vibration processes in the operation of mobile agricultural units as a mechanical systems. Scientific and educational journal the progressive researchers «Science & Genesis». April №. 1. 151–155.

Klets D. M. (2013). Modeling of Mobile Vehicle Skid in Traction Movement Mode. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, 15. 7. 156-161.

Oppenheim A. V., Schaffer B. W., Buck J. R. (1999) Discrete-time signal processing. Prentice – Hall. 332 p.

Ovsyannikov S., Kalinin E., & Koliesnik I. (2018). Oscillation process of multi-support machines when driving over irregularities. Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. 307–317.

Sergienko O. (2011) Estimation of Vehicle Acceleration Under Performance Tests By Optimal Observer Application. *Вісник ХНАДУ*. 55. P. 58–64.

Shulyak M. L. (2015). Oscillation of the speed of the MTA variable mass at a steady state of motion. *Motrol Commission of motorization and energetics in agriculture*. 17, 23–29.

Shulyak M. L. & Lebedev A. T. (2016). Assessment of the sustainability of agricultural technologies in crop production to changes in the parameters and operating modes of tractor units. *Motrol Commission of motorization and energetics in agriculture*. 18 5. 53–58.

References

Artemov N. P. (2012). The method of partial accelerations and its applications in the dynamics of mobile machines / Artemov N. P., Lebedev A. T., Podrigalo M. A. and others. Ed. Podrigalo M. A. Kharkov: Miskdruk. 219 p.

Artemov N. P. & Shulyak M.L. (2015). Analysis and control of random vibration processes in the operation of mobile agricultural units as a mechanical systems. *Scientific and educational journal the progressive researchers «Science & Genesis»*. April №. 1. 151–155.

DSTU ISO 9000:2015. Quality management systems - Fundamentals and vocabulary (ISO 9000:2015, IDT) (2015). Kyiv, 2015. 19 p. (National standard of Ukraine).

DSTU 2860-94. The reliability of technology. The terms are the same. Kiev: State Standard of Ukraine, 1994. - 36 p. (National standard of Ukraine).

DSTU 7463:2013. Strong technology. Tractors from the countryside. Classification of indications. K., 2013. 11 p. (National standard of Ukraine).

Klets D. M. (2013). Modeling of Mobile Vehicle Skid in Traction Movement Mode. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, 15. 7. 156-161.

Kodenko M. N., Lebedev A. T. (1969). Automation of tractor units. M.: Mashinostroenie. 196 p.

Lebedev A. T., Lebedev S. A., Korobko A. I. (2018). Qualimetry and metrological safety of testing tractors / Ed. A. T. Lebedev. Kharkiv: View of «Miskdruk». 394 p.

Lebedev S., Korobko A., Kozlov Yu. (2017)

Development of express methods and technical methods for estimating the capacity of tractors and knots of agricultural and agricultural equipment. *Technics and technologies of the agro-industrial complex*. № 8. P. 33–39.

Lebedev A., Lebedev S. (2021) Technological adaptation of tractors of general purpose. *Technics and technologies of the agro-industrial complex*. № 4 (121). pp. 17–21.

Migal V. D. (2001) A systematic approach to assessing the quality of tractors. *Bulletin of Kharkiv State Technical University of the State of Agriculture*. № 7, pp. 73–86.

Oppenheim A. V., Schaffer B. W., Buck J. R. (1999) *Discrete-time signal processing*. Prentice – Hall. 332 p.

Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) Code of Standards (2016) *Performance Testing of Agricultural Tractors* (official translation): informational publication. M. : FGBNU «Rosinformagrotech», 2016. 104 p.

Ovsyannikov S., Kalinin E., & Koliesnik I. (2018). Oscillation process of multi-support machines when driving over irregularities. *Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*. 307–317.

Selivanov N. I. (2008) Efficient use of energy-saturated tractors. Krasnoyar. state agrarian un-t. 229 p.

Sergienko O. (2011) Estimation of Vehicle Acceleration Under Performance Tests By Optimal Observer Application. *Bulletin of KHNAHU*. 55. P. 58–64.

Shulyak M.L. (2015). Oscillation of the speed of the MTA variable mass at a steady state of motion. *Motrol Commission of motorization and energetics in agriculture*. 17, 23–29.

Shulyak M. L. & Lebedev A. T. (2016). Assessment of the sustainability of agricultural technologies in crop production to changes in the parameters and operating modes of tractor units. *Motrol Commission of motorization and energetics in agriculture*. 18 5. 53–58.

Tractors (1981) Design, construction and calculation. Ksenevich I. P., Guskov V. V., Bocharov N. F. and etc.; ed. Ksenevich I. P. M.: Mashinostroenie. 544 p.

Uemov A. I. (1978) *Systems Approach and General Systems Theory*. Thought. 272 p.

UDC 631.37-076

A SYSTEM APPROACH FOR ASSESSING PERFORMANCE IN AGRICULTURAL TRACTORS

Lebedev A., D-r Eng. Scs, Prof.,

e-mail: tiaxntusg@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1975-3323>,

State Biotechnological University

Lebedev S., Ph. D in Eng., L.,

e-mail: hfukrndipvt@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3067-5135>

Korobko A., Ph. D in Eng., Associate Prof., Leading Researcher,

e-mail: ak82andrey@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6618-7790>.

Kharkiv branch of L. Pogoriliy UkrNDIPVT

Summary

Purpose of the study. Formation of a methodology for systematic evaluation of performance in agricultural tractors.

Research methods. The methodological basis for evaluating the performance of agricultural tractors is the OECD Code 2. Code 2 of the OECD standardizes test methods. Determination of traction indicators for tractors is carried out by the method regulated by the SOU L. Pogorslyy UkrNDIPVT 71.2-37-046043090-017:2015. A measuring and registration complex is used. When evaluating the functional accuracy of the tractor, according to DSTU 7463:2013, indicators are analyzed that determine the traction class of the tractor, energy capabilities and aggregation. An analytical method and a comparative analysis with the results of experimental studies are used to form a scientific problem, determine the purpose and set the objectives of the study.

The results of the study. The research results develop a methodology for a systematic approach to assessing the operational quality of agricultural tractors. Direction of research to improve the technical, economic and agro technical properties. New dependencies are proposed (they use the method of partial accelerations) for estimating the traction and energy performance of the tractor, handling and driving stability, and braking properties. A technique for estimating the dynamic properties of a tractor as part of a tillage unit in an unsteady mode of its movement on the rut is substantiated. Code 2 of the OECD standardizes the testing methodology for agricultural tractors regarding the evaluation of their performance under nominal technical condition. The results of the studies that are given in the article prove that the deviations of real functional parameters from the nominal ones significantly affect the performance of the tractor.

Conclusions. According to the results of the research carried out, the classification of the performance of agricultural tractors was carried out according to their traction and agro technical properties. The research results made it possible to formulate the main theoretical and scientific-practical conclusions. A methodology for a systematic approach to assessing the performance of agricultural tractors has been formulated, based on the substantiated method of partial accelerations. Using the method of partial accelerations, the dependences of the effective power of the engine, the efficiency of the tractor, the mass and resistance of the agricultural machine aggregated with the tractor, the braking properties of the tractor, its controllability and driving stability on the rut are substantiated. Analytically proved and experimentally confirmed the instability of the traction force of the tractor, the resistance of the agricultural machine of the tillage unit, the dynamic performance of which exceeds the average values by 2.5-3.0 times.

Keywords: tractor, system approach, operational properties, traction properties, controllability, braking properties.