

## ФОРМУВАННЯ МЕТОДОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ТРАКТОРА В ТЯГОВОМУ РЕЖИМІ ЗА НЕСТАБІЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ СТАНУ

**Лебедєв Анатолій Тихонович**

доктор технічних наук, професор  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна,  
ORCID: 0000-0002-1975-3323  
tiauxntusg@gmail.com

**Шуляк Михайло Леонідович**

доктор, технічних наук, професор  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0000-0001-7286-6602  
m.l.shulyak@gmail.com

**Лебедєв Сергій Анатолійович**

кандидат технічних наук, директор  
Харківська філія Українського науково-дослідного інституту  
прогнозування та випробовування техніки і технологій  
для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого, м. Харків, Україна  
ORCID: 0000-0002-3067-5135  
hfukrndipvt@gmail.com

**Шапошник Віталій Сергійович**

аспірант  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0009-0002-4897-2936  
shaposhnyk@online.ua

**Подлесний Анатолій Володимирович**

аспірант  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0009-0004-1161-0012  
podlesnyjanatolij85@gmail.com

*В статті розглядаються проблеми підвищення працездатності трактора за нестабільних параметрів стану, що характеризуються не тільки здатністю трактора працювати (виконувати задані функції), але і забезпеченням відповідності нормативно-технічній та конструкторській документації. Враховуючи, що забезпечення стабільності функціонування трактора в тяговому режимі є основою підвищення його працездатності, дослідженню була подана методологія забезпечення точності його функціонування за нестабільних параметрів стану. До функціональних показників у відповідності до діючих на Україні нормативних документів віднесені тягово-швидкісні властивості трактора в тяговому режимі, стійкість руху і гальмування. За допомогою вимірювально-ресстраційного комплексу, розробленого на основі методу парціальних прискорень за участі авторів даної статті, оцінені функціональні показники тракторів John Deere 8335R, John Deere 8430R при виконанні різних агротехнологій. Максимальна похибка при співставленні теоретичних та експериментальними результатами не перевищує 5%. Відомі методи і засоби по оцінці функціональних показників тракторів при агрегуванні з навісними, причіпними і т. д. сільгоспмашинами, що базуються на динамометричних засобах, не прийнятні при оцінюванні працездатності трактора в різних умовах експлуатації. Відкритим залишається питання підвищення працездатності тракторів у складі транспортно-технологічних агрегатів змінної маси, комбінованих агрегатів при виконанні різних агротехнологій, що, на сьогодні, користуються найбільшим попитом у аграрному секторі України. За результатами проведених досліджень обґрунтовано методологію підвищення працездатності трактора в тяговому режимі шляхом забезпечення стабільності функціональних показників. Теоретично доведено та отримало експериментальне підтвердження твердження, що трактор в тяговому режимі працездатний при забезпеченні стабільності тягово-швидкісних властивостей, стійкості руху і гальмування. Сформульована методологія забезпечення функціональної точності трактора в тяговому режимі при оцінюванні його вихідних і вхідних параметрів. Запропонована методика оцінювання достовірності контролю функціональної точності і працездатності трактора за помилками I роду (пропуск відмови) і II роду (помилкова відмова).*

**Ключові слова:** трактор, тяговий режим, функціональні показники, нестабільність стану, точність вимірювань, достовірність контролю, працездатність.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.3.10>

**Вступ.** Експлуатаційно-технологічні показники трактора визначаються в основному його працездатністю, тобто його станом, при якому значення всіх його параметрів, що характеризують здатність виконувати задані функції відповідають встановленим вимогам. У зв'язку з цим обґрунтування методів оцінки працездатності тракторів із забезпеченням стабільності функціональних показників за швидкістю руху, стійкістю напрямку руху і гальмування (DSTU7463, 2013), (OECD, Code 2, 2012) дозволить підвищити ефективність їх роботи під час експлуатації.

Відомі методи оцінки працездатності тракторів базуються в основному на нормативних матеріалах визначення допустимого відхилення параметрів технічного стану і прогнозування залишкового ресурсу його агрегатів (DSTU2861–94, 1994). При цьому технічний стан трактора оцінюється в процесі діагностування сукупністю якісних і кількісних характеристик його властивостей, що розглядаються в певних умовах експлуатації. На кінцевому етапі діагностування визначається технічний стан трактора, його агрегатів і систем (Lebedev et al., 2018). При цьому немає можливості оцінити взаємозв'язок технічного стану трактора з його функціонуванням, тобто працездатністю. Основними кількісними характеристиками слугують встановлені допуски на рівень і точність настроювання по контрольованому (технологічному, енергетичному, техніко-економічному, технічному) параметру, а також контрольні допуски, що визначають граничні межі параметрів, перевищення яких в процесі експлуатації призводить до втрати працездатності трактора (ДСТУ ГОСТ ISO 5725–1, 2005).

Для оцінки ефективності функціонування, тобто працездатності технічних систем, зокрема рухомих об'єктів і технологічних процесів, ефективно використовується метод зміни стану, заснований на понятті стану (Lebedev et al., 2018). За даним методом за стан системи у момент часу  $t_0$  прийнятий такий мінімальний набір відомостей про поведінку системи, інформації якого разом з деякою вхідною функцією  $U(t)$ , заданої для інтервалу часу  $t_0 \leq t \leq t_k$ ,  $t_k \leq 0$ . Нестабільність параметрів стану систем трактора

обумовлена, в основному, зносом, порушенням регулювань, тощо, їх елементів, що призводять до несправного стану трактора. При кваліметричному оцінюванні трактора (Lebedev et al., 2018) і його елементів необхідно вимірювати значення показників його стану з необхідною точністю, яка оцінюється за різницею вихідного сигналу при початковому значенні параметру системи  $\beta = 0$  і деяким його відхиленням  $\beta = \beta_i$  від номінального стану. Суттєва особливість вимірювання працездатності трактора не отримала належного висвітлення в технічній літературі.

Рішення проблеми впливу нестабільності технічного стану трактора на його експлуатаційні властивості висвітлена у ряді робіт закордонних видань (Jiahao Qin et al., 2021, Zhen Li et al., 2015, Lebedev et al., 2023), в яких визначається перспективність досліджень у напрямку підвищення працездатності трактора за нестабільних параметрів стану.

**Метою дослідження** є підвищення працездатності трактора в тяговому режимі шляхом забезпечення стабільності функціональних показників.

**Завдання роботи:**

- теоретичне обґрунтування працездатності трактора при виконанні агротехнічного процесу;
- обґрунтування методології забезпечення функціональної точності трактора в тяговому режимі;
- оцінка достовірності контролю реального технічного стану трактора при технічному обслуговуванні.

**Методика проведених досліджень.** Методологічною основою роботи є метод парціальних прискорень, що базується на прискоренні розгону тракторного агрегату при оцінюванні його тягово-швидкісних показників, стійкості напрямку руху і гальмування (Lebedev et al., 2018). Лінійні прискорення агрегату реєструються за допомогою вимірювально-реєстраційного комплексу, розробленого ті виготовленого при участі авторів даної статті (рис. 1).

Робота вимірювально-реєстраційного комплексу базується на методі парціальних прискорень, за яким діючі на трактор сили оцінюються за його прискорень.

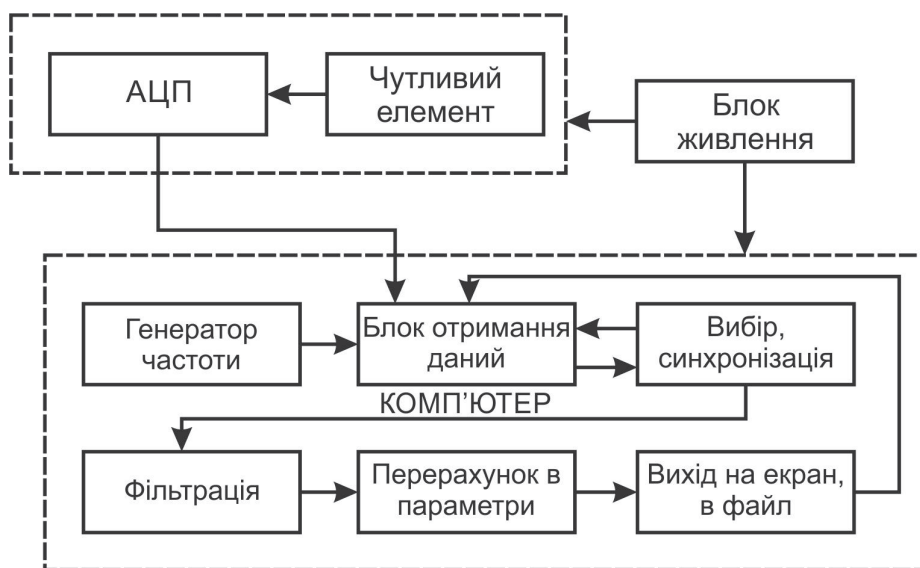


Рис. 1. Схема роботи вимірювально-реєстраційного комплексу для контролю прискорень

Основою комплексу є датчики прискорень – акселерометри MMA 7260 QT, що мають три робочі вісі та визначену межу вимірювання прискорень  $\pm 1,5g$ . За своїми технічними характеристиками MMA 7260 QT використовують низку напругу до 2,2...3,6 В й мають підвищену чутливість (800 мВ/г), характеризується швидкою ініціалізацією, доброю захищеністю від перепадів напруги та впливу статичної електрики.

Експериментальні дослідження з оцінювання функціональних показників тракторного агрегату проведені в Харківській філії УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого на тракторному агрегаті John Deere 8430 ( $N_e = 253$  кВт) + дискова борона John Deere 637 (рис. 2).

За допомогою вимірювально-реєстраційного комплексу оцінюються функціональні показники тракторного агрегату, до яких віднесені (OECD, Code 2, 2012) *тягово-швидкісні показники, стійкість напрямку руху і гальмування*.

Для визначення тягового зусилля на ведучих колесах трактора  $P_T$  за відомих масах трактора та агрегатуємої сільгоспмашини оцінюється різниця лінійного прискорення агрегату при розгоні  $\dot{v}_T(v)$  і вибігу  $\dot{v}_T^B(v)$  (вимкнена муфта зчеплення, нейтральна передача трансмісії); при визначенні тягового зусилля на гаку  $P_{ак}$  оцінюється прискорення розгону трактора за дії тільки опору кочення на колесах. При відомій швидкості  $v_T$  трактора оцінюється ефективна потужність двигуна  $N_e(v) = P_T v_T$  і потужність на гаку трактора  $N_{ак}(v) = P_{ак} v_T$ .

Стійкість напрямку руху тракторного агрегату взаємопов'язана з керованістю трактора, яка характеризує його властивість реагувати на дії, що йдуть від оператора та спрямовані на відновлення або зміни напрямку руху. Перехідний процес з одного стану рівноваги трактора у інший, що спричиняє вплив оператора, супроводжується коливаннями швидкості руху трактора. При цьому прискорення характеризують не тільки ступінь керованості, але й зміну технічного стану трактора. Оцінювання керованості трактора на перехідних (несталих) режиму повороту виконується по коефіцієнту керованості  $K_{кер}$ , що дорівнює відношенню повертаючої сили  $P_{кер}$  до сил опору повороту  $\Sigma P_{кер}$ . При швидкому припиненні дії керуючого впливу та зниженні сил опору повороту  $K_{кер}$  характеризується негативним відношенням парціальних керуючих прискорень  $\dot{v}_{кер}^n$  і сил опору повороту  $\dot{v}_c^n$ . Зміна

у процесі експлуатації  $K_{кер}$  характеризує технічний стан рульового керування трактора.

Оцінка стійкості гальмування трактора визначається за показниками: темп наростання уповільнення, фізичний зміст якого – тангенс кута нахилу лінії в координатах «уповільнення-час» при наростанні тиску в приводі гальмівної системи від нуля до максимального; кут відхилення трактора від прямолінійності.

**Результати досліджень.** На трактор при виконанні технологічного процесу діють на вході вектора-функції управління  $u(t)$  і збурення  $F(t)$ , на виході – вектор-функція динамічних властивостей трактора  $w(t)$ , яка визначається нестабільністю функціональних показників:  $v(t)$  – швидкості руху;  $y_n(t)$  і  $y_m(t)$  – стійкості напрямки руху і гальмування (рис. 3).

На трактор діють як керовані вхідні вектор-функції керування  $u_{iy}$  [ $i(t)$  – передавальне число трансмісії,  $q(t)$  – подача палива у двигун,  $k(t)$  – інтенсивність впливу на рульове керування,  $P(t)$  – зусилля на органи керування гальмами], так і не керовані  $u_{in}$  [ $R(t)$  – опір руху,  $C(t)$  – рельєф місцевості,  $\delta(t)$  – буксування рушіїв]. Збурювання  $F(t)$  визначаються в основному некерованими змінними  $u_{in}(t)$  внаслідок нестабільності опору руху трактора  $f_R(t)$ , зміни рельєфу місцевості  $f_C(t)$  і нестабільності буксування рушіїв  $f_\delta(t)$ .

Функціональний показник  $v(t)$  характеризується, в основному, вхідними функціями керування  $i(t)$  та  $q(t)$  і визначає тягово-енергетичні властивості трактора; показники  $y_n(t)$  та  $y_m(t)$  взаємопов'язані в основному з  $v(t)$ , керованими  $k(t)$ ,  $P(t)$  і некерованими  $R(t)$ ,  $C(t)$ ,  $\delta(t)$  вхідними перемінними та направлені на забезпечення безпеки руху трактора.

Трактор буде працездатним якщо його технічний стан забезпечує зміна координат  $v(t)$ ,  $y_n(t)$  і  $y_m(t)$  у межах, обумовлених нормативно-технічною документацією.

При цьому працездатні всі системи, що входять в нього, а при непрацездатності хоч би однієї системи – трактор непрацездатний. При зміні технічного стану трактора координати  $v(t)$ ,  $y_n(t)$  і  $y_m(t)$  наближаються до деяких граничних значень, при яких трактор буде непрацездатним, тобто  $\bar{x} = (v_1, \dots, v_n; y_{n1}, \dots, y_{nn}; y_{m1}, \dots, y_{mr})$ . У цьому випадку вектор  $\bar{x}$  буде характеризувати працездатність трактора.

При оцінці руху  $v(t)$  працездатність може бути оцінена функцією  $\bar{x}_v = (v_1, \dots, v_n)$ . При цьому вектору  $\bar{x}_v$



Рис. 2. Загальний вигляд агрегату John Deere 8430 ( $N_e = 253$  кВт) + дискова борона John Deere 637

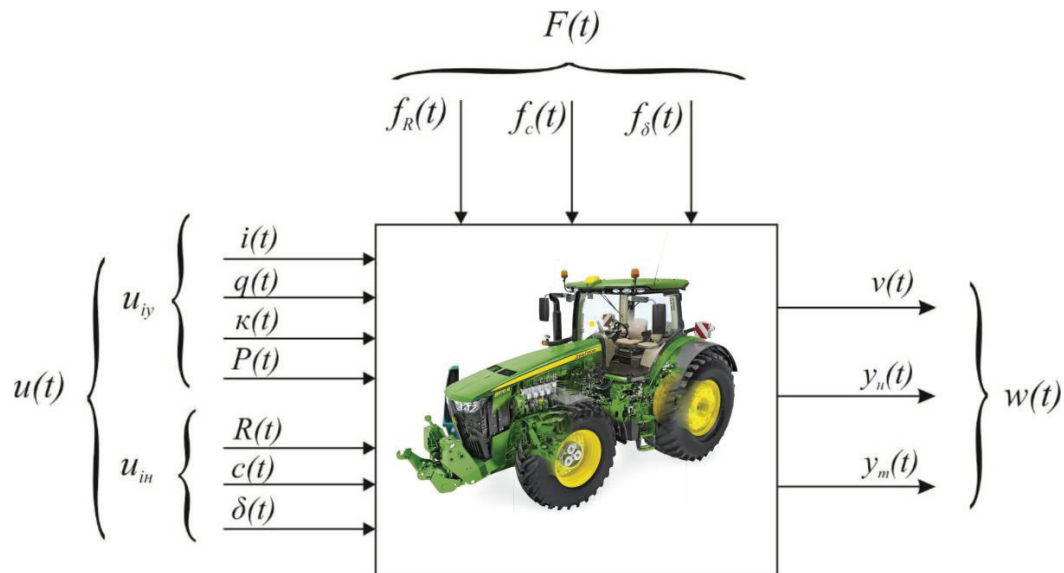


Рис. 3. Функціональна схема трактора

відповідає число  $R(\bar{x}_v)$ , при чому  $R(\bar{x}_v) > 0$  і зростає до  $\infty$  при  $\bar{x}_v \rightarrow \bar{V} = (v_1, \dots, v_n)$ , де  $\bar{V}$  – критичний вектор і  $R(\bar{x}_v) \rightarrow \infty$  при  $v_i \rightarrow V_i$ . В цьому випадку

$$R(\bar{x}_v) = \frac{[N_i(\bar{x}_v)]^\alpha}{[z(\bar{x}_v)]^\alpha}, \text{ де } i = 1, 2; \alpha > 0 - \text{довільне число,}$$

$$z(\bar{x}_v) = \prod_{i=1}^n |v_i - V_i|^{a_i}, N_i(\bar{x}_v) = \sum_{i=1}^n \alpha_i |v_i - V_i|; a_i > 0 - \text{коефіцієнт ваги } V_i, \alpha_i > 0 - \text{довільне число.}$$

При  $q_i = 1 / (n - 1)$ ;  $q_i > \alpha > 1$  можна записати

$$R(\bar{x}_v) = \sum_{i=1}^n \alpha_i |v_i - V_i| \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n (v_i - V_i)}. \quad (1)$$

Вираз (1) володіє тією властивістю, що при  $v_i \rightarrow V_i$  порядок чисельника при прямуванні до нуля нижче, ніж порядок знаменника, і  $R(\bar{x}_v)$  обертається в  $\infty$

із швидкістю  $1/n^{\alpha \left(\frac{n}{n-1}\right)^{(n-\infty)}$ , а при  $\alpha = 1$  – з швидкістю

$1/n^{\frac{1}{n-1}}$ . В цьому випадку працездатність трактора по координаті  $v$  може бути оцінена виразом

$$H(x_v) = \frac{1}{R(\bar{x}_v)}. \quad (2)$$

Даний вираз характеризує стан трактора, коли  $v_i$  досяг  $V_i$  при зміні  $H(x_v)$  від  $H_{\max}$  до 0 (при  $v_i = V_i$ ), характеризуючи ступінь працездатності трактора. Аналогічно може бути оцінена працездатність трактора по координатах  $y_n(t)$  і  $y_m(t)$ .

Оцінюючі працездатність трактора критичні значення векторів руху швидкості  $\bar{v}$ , прямолинійної стійкості  $\bar{j}$  і глибини  $\bar{z}$  робочого органу агрегатованої сільгоспмашини зазвичай вибираються за експериментальними даними. Так  $\bar{v}$  вибирається виходячи з оптимального завантаження двигуна  $x = 0,95$  на енергоємних роботах; вектор  $\bar{j}$  оцінюється запасами стійкості прямолинійного руху, наприклад для трактора з шарнірно-зчленованою

рамою на оранці, по фазі  $\Delta \varphi \geq 1,5^\circ$  і по амплітуді  $\Delta L \geq 12$  дБ; вектор  $\bar{z}$  обґрунтовується агротехнічними вимогами, наприклад при силовому регулюванні орного агрегату допустимим коефіцієнт варіації для глибини оранки повинен бути не більше  $V_{\text{доп}} \leq 15\%$ . Дані нормативи працездатного стану трактора формується при умові відсутності несправностей елементів і збереження його працездатності.

Експериментально доказано (Lebedev et al., 2013), що для ґрунтообробного агрегату (John Deere 8430 – трактор + John Deere 637 – дискова борона) працездатність за стійкістю і керованістю забезпечується при зміні потужності двигуна від 73 кВт до 78 кВт замість статично визначеної 93,61 кВт. Наявність надлишкової потужності двигуна дозволяє якісно виконувати технологічний процес, оскільки надає можливість або зберегти задані параметри при періодичному підвищенні опору руху (зовнішні збурення), або змінювати керовані параметри в заданих межах механізатором.

Несправності трактора і його елементів призведе до зниження його функціональної стабільності. Результати досліджень тягово-швидкісних властивостей трактора John Deere 8335R ( $N_e$  – 246 кВт,  $N_T$  – 212 кВт), проведені в Харківській філії УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, підтвердили зниження потужності двигуна  $N_e$  на 15% і тягової потужності трактора  $N_T$  на 10% при його несправностях: обмеження забору повітря; засмічено паливні фільтри двигуна; неправильно відрегульоване знаряддя; трансмісія пропускає передачі. Дані несправності є наслідком нестабільності параметрів стану систем трактора, обумовлених в основному зносом, порушенням регулювань їх елементів, що призводять до несправного стану трактора. Точність визначення дійсного стану трактора і відхилення його до вимог нормативної і технічної документації (НТД) є основною задачею забезпечення його працездатності.

Застосовуючи основні положення теорії точності складних систем, при оцінюванні функціональної точності трактора необхідно розглянути процес виконання трактором заданих функцій, спрямованих на досягнення поставленої мети, що характеризується певними значеннями її параметрів (вихідний, первинний, вторинний). При цьому вихідний параметр є результатом розв'язання функціонального завдання відповідно до цільового призначення трактора в цілому (тягове зусилля, швидкість руху) або його складових елементів (двигун, вал відбору потужності, тощо).

Повний параметр трактора визначається за безпосереднього контролю, зміні складових елементів, а вторинний – є деякою функцією первинних параметрів. Наприклад, тягове зусилля трактора залежить від потужності двигуна, швидкість руху трактора – від частоти обертання колінчастого валу, передавального числа трансмісії, тощо.

Вихідний параметр трактора  $x$ , зазвичай, є вторинним. Будь-яке значення вихідного параметру є результатом перетворення деяких первинних за відношенням до нього величин. Такими первинними величинами є характеристики вхідних сигналів  $S$  і параметрів  $q$  елементів (двигуна, трансмісії, тощо) трактора. Відповідно до цього, модель трактора обґрунтовується за функціональною залежністю  $x = \varphi(S, q)$ . За номінальних значень параметрів  $S_n, q_n$ , які відповідають вимогам нормативно-технічної документації, дана модель має вид  $x_n = \varphi(S_n, q_n)$ . Ступінь відмінності реальної моделі  $x$  від номінальної  $x_n$  оцінюється похибкою трактора  $\Delta x = x - x_n$ , що характеризує його функціональну точність, тобто здатність трактора виконувати задані функції з певним ступенем близькості до номінальної моделі.

За виходу значень похибки  $\Delta x$  функціонування трактора за допустимі межі, він втрачає працездатність, тобто здатність функціонувати з необхідним (заданим) ступенем точності.

За  $q_1, q_2, \dots, q_n$  елементів трактора (двигун, трансмісія, тощо) і вхідним сигналом стану даних елементів, модель функціонування трактора записується у виді

$$x = \varphi(S, q_1, q_2, \dots, q_n). \quad (3)$$

За  $S_k$  вхідному сигналу контролю кожного  $q_k$  елементу трактора, залежність можна записати

$$q_{ik} = q_{ik}(S_{1k}, \dots, S_{nk}, x_{1k}, \dots, x_{nk}). \quad (4)$$

При цьому, отримуємо вихідний параметр на момент закінчення контролю у виді наступної функції

$$x_k = x_k(S, S_{1k}, \dots, S_{nk}, x_{1k}, \dots, x_{nk}). \quad (5)$$

За контролю трактора в експлуатації, значення параметрів складних його елементів змінюються стають рівними

$$q_i = q_{ik} + \Delta q_i, \quad (6)$$

де  $\Delta q_i = \Delta q_{iy}$  – відхилення параметру  $i$ -го елемента трактора за контролю, обумовлене не ідентичністю умов контролю.

З урахуванням залежностей (4) і (6) записується рівняння контрольованого функціонального параметру у виді функції величин

$$x = x(S, S_{1k}, \dots, S_{nk}, x_{1k}, \dots, x_{nk}, \Delta q_1, \dots, \Delta q_n). \quad (7)$$

Оцінювання функціональної точності трактора проводиться шляхом порівняння його параметрів з номінальними значеннями, які визначені у нормативно-технічній документації.

Для трактора, як складної системи, приймаємо за функціональну точність – здатність виконувати визначені функції з певним ступенем наближення до ідеальної моделі, функціональна похибка трактора за  $x, x_n$  поточних (з врахуванням змін в експлуатації) і номінальних (визначених заводом-виробником) значеннях функціональних параметрів оцінюється за залежністю:

$$\Delta x = x - x_n. \quad (8)$$

Вірогідність контролю функціональної точності і працездатності трактора можна оцінити за залежністю:

$$D = 1 - (P_1 + P_2), \quad (9)$$

де  $P_1$  і  $P_2$  – імовірності виникнення помилок, відповідно, першого роду – пропуск відмови і другого роду – помилкова відмова.

Імовірності виникнення помилок  $P_1$  і  $P_2$  залежать від визначених законів розподілу отриманих значень функціональних параметрів й похибок дослідних вимірів параметрів, що контролюються, та часу вимірювань і характеристики поля допуску. Трактор, як об'єкт контролю, буде придатним ( $\Gamma$ ) до подальшої експлуатації (працездатним), у випадку, якщо результат вимірювання задовольняє умові

$$c \leq y \leq d, \quad (10)$$

де  $c, d$  – межі поля допуску контрольованого параметру  $y$ ,  $2\delta = d - c$ ;  $y = x_k + \Delta x_k$ ;  $x_k$ ;  $\Delta x_k$  – дійсне значення контрольованого параметра і похибка його вимірювання.

За невиконання умови (10) робиться можемо прийти до висновку про подальшу непридатність ( $\bar{\Gamma}$ ) трактора до експлуатації. Для ймовірностей подій  $\Gamma$  і  $\bar{\Gamma}$  виконується рівність  $P_\Gamma + P_{\bar{\Gamma}} = 1$ .

За контролю функціональних параметрів трактора, їх значення дорівнюють

$$x = x_k + \Delta x_n, \quad (11)$$

де  $\Delta x_n$  – відхилення параметра від його значення, обумовлене похибками вимірювань.

Трактор під час контролю буде у справному стані, якщо кожен з його функціональних параметрів буде знаходитися в області, яка визначає працездатність ( $a, b$ ):

$$a < x < b. \quad (12)$$

Про стан трактора до проведення контролю можуть бути висловлені дві взаємовиключні гіпотези: трактор справний ( $C$ ), якщо виконується умова (12); трактор несправне ( $\bar{C}$ ) за невиконання умови (10). Сума ймовірностей даних подій  $P_C + P_{\bar{C}} = 1$ .

Заміна умови (12) правилом (10) призводить до хибних рішень:

- $y \in (c, d)$ ,  $x \notin (a, b)$  – невиявлена відмова ( $\bar{C} / \Gamma$ );
- $y \notin (c, d)$ ,  $x \in (a, b)$  – помилкова відмова ( $C / \bar{\Gamma}$ ).

Вірні висновки робляться у наступних ситуаціях:

- $y \in (c, d)$ ,  $x \in (a, b)$  – вірний висновок «трактор придатний» ( $C / \Gamma$ );

–  $y \in (c, d)$ ,  $x \notin (a, b)$  – вірний висновок «трактор непридатний» ( $\bar{C} / \bar{\Gamma}$ ).

Для ймовірностей даних подій виконується рівність (рис. 4)

$$P_{\text{но}} + P_{\text{ло}} + P_{\text{вз}}^r + P_{\text{вз}}^{\bar{r}} = 1, \quad (13)$$

де  $P_{\text{но}}$ ,  $P_{\text{ло}}$ ,  $P_{\text{вз}}^r$ ,  $P_{\text{вз}}^{\bar{r}}$  – імовірності несправних тракторів, наявність серед справних тракторів невірно забракованих, вірно визнаних придатними і непридатними до подальшої експлуатації, відповідно.

З цієї схеми випливає, що

$$P_{\text{но}} = P_{\Gamma} - P_{\text{вз}}^r = P_{\bar{C}} - P_{\text{вз}}^{\bar{r}} = 1; \quad P_{\text{ло}} = P_{\bar{C}} - P_{\text{вз}}^{\bar{r}} = P_{\Gamma} - P_{\text{вз}}^r. \quad (14)$$

Подія, що полягає в тому, що серед визнаних придатними тракторами є несправні елементи, оцінюється умовною імовірністю невиявленої відмови

$$P_{\text{но}} = \frac{P_{\text{но}}}{P_{\Gamma}} = 1 - \frac{P_{\text{вз}}^r}{P_{\Gamma}}. \quad (15)$$

Наприклад, при оцінюванні придатності трактора до подальшої експлуатації за тяговим показником можлива невиявлена відмова за граничним зносом муфти зчеплення, шин трактора, тощо.

Помилкова відмова оцінюється умовною імовірністю того, що серед справних тракторів є невірно забраковані

$$P_{\text{ло}} = \frac{P_{\text{ло}}}{P_{\bar{C}}} = 1 - \frac{P_{\text{вз}}^{\bar{r}}}{P_{\bar{C}}}. \quad (16)$$

Наприклад, при зростанні витрати палива на одиницю виконаної роботи (питомої витрати палива) помилково можуть проводитись операції з ремонту або заміни елементи паливної системи, при цьому основне джерело даної відмови викликано зношенням протектора шини, що, як наслідок, веде до підвищеного буксування рушіїв.

За допомогою вимірювально-реєстраційного комплексу в Харківській філії УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого оцінені функціональні показники трактора John Deere 8335R при напрацюванні 1000 м.-г. в різних умовах експлуатації. При технічному обслуговуванні (ТО), що виконується щодня (або 10 мотогодин), кожні 250, 500 і 1000

мотогодин, перевірявся рівень моторного масла, трансмісійної та гідравлічної рідини; зливався відстій із фільтрів, змащувалися рухомі з'єднання елементів трактора і т. п.

При виконанні трактором John Deere 8335R ґрунтообробних робіт експериментально доказано, що зниження тягово-швидкісних показників трактора є в основному наслідком *не достатньої потужності двигуна; стійкості напрямку руху* (трактор заносить або тягне в один бік) внаслідок бічного навантаження на трактор або рульове колесо не самоцентрується; *стійкості гальмування* внаслідок втрати герметичності пневматичних і гідравлічних елементів, порушення регулювань, зносу елементів і інших несправностей.

Недостатня потужність двигуна є наслідком несправностей обмеження забору повітря, перегріву двигуна і невірно вибраного баласту, усунених оператором. Несправності відмови у роботі турбокомпресора усунена дилером John Deere.

Достовірність контролю функціональної точності і працездатності тракторів надає істотне значення на ефективність їх використання. Низька достовірність контролю, що характеризує ступінь об'єктивності оцінки реального стану контрольованого елемента може призвести до помилок I роду (пропуск відмови) і II роду (помилкова відмова) (Lebedev et al., 2018). Помилки I роду призводять до не виправданих демонтажних робіт для усунення відмови, II роду – до матеріальних втрат на зміну придатних до експлуатації елементів трактора. Наприклад, до помилок I роду по недостатній потужності двигуна пропущена несправність «Не відповідний зазор клапана»; по системі рульового керування не усунена несправність електричної системи, внаслідок чого трактор не виконує короткий поворот. До помилок II роду по двигуну віднесена несправність «Підтікає прокладка випускного колектора»; по гальмівним системам по «Зносу фрикційних елементів».

**Обговорення.** Результати досліджень спрямовані на розвиток методології підвищення працездатності трактора в тяговому режимі. Запропоновані нові залежності,

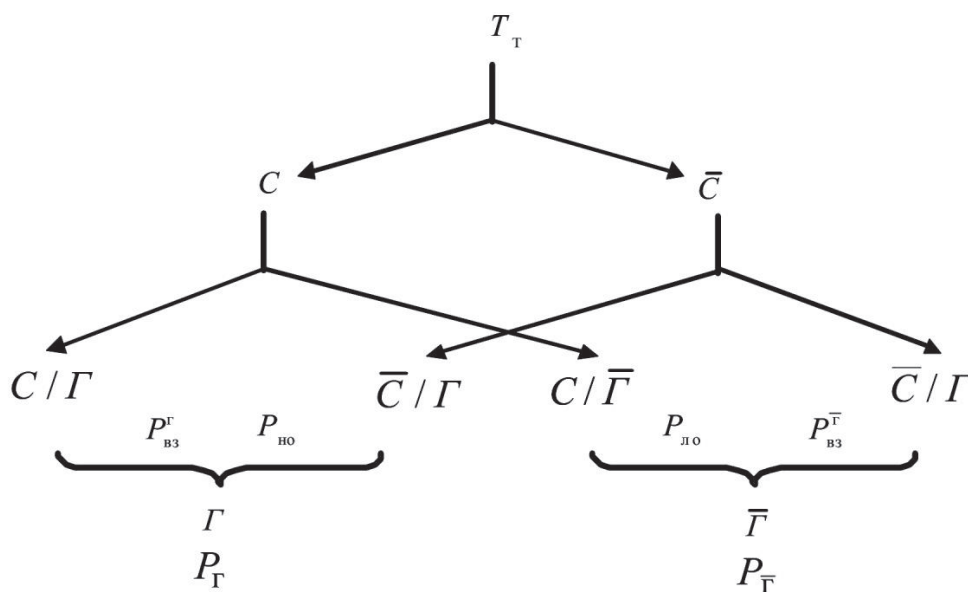


Рис. 4. Схема формування і оцінювання ймовірності результатів контролю трансмісії ( $T_T$ )

що базуються на методі парціальних прискорень (Klets, 2013), оцінки тягово-швидкісних властивостей трактора в тяговому режимі, стійкості руху і гальмування. Дані залежності за нормативним документом віднесені до функціональних показників трактора (OECD, Code 2, 2012) при номінальному його технічному стані. Одночасно необхідно відмітити недостатню кількість наукових робіт по оцінці функціональних показників трактора при нестабільних параметрах стану, регламентованих нормативною документацією України (DSTU2861–94, 1994).

В даній статті пропонується технічний стан трактора оцінювати в процесі діагностування сукупністю якісних і кількісних характеристик його властивостей, що розглядаються в певних умовах експлуатації. На кінцевому етапі діагностування визначається технічний стан трактора, його агрегатів і систем. При цьому за обґрунтованою методологією оцінюється взаємозв'язок технічного стану трактора з його функціонуванням, тобто працездатністю.

При кваліметричному оцінюванні трактора і його елементів необхідно вимірювати значення показників його стану з необхідною точністю, яка оцінюється за різницею вихідного сигналу при початковому значенні параметру системи і деяким його відхиленням від номінального стану. Суттєва особливість підвищення працездатності трактора за нестабільних параметрів, особливо при виконанні агротехнологічного процесу, реалізована в методиці оцінки його точності функціонування. За допомогою вимірювально-реєстраційного комплексу, розробленого за участі авторів даної статті, оцінені функціональні показники тракторів John Deere 8430 на ґрунтообробних роботах і John Deere 8335R при напрацюванні 1000 м.-г. в різних умовах експлуатації. Запропонована методика оцінки достовірності контролю функціональної точності і працездатності тракторів за помилками I роду (пропуск відмови) і II роду (помилкова відмова).

Аналіз відомих наукових робіт і публікацій по підвищенню працездатності тракторів шляхом забезпечення їх функціональної стабільності при виконанні різних агротехнологій не систематизовані, для транспортно-технологічних агрегатів змінної маси, найбільш затребуваних в останній час в аграрному секторі України, дані показники не обґрунтовані. Актуальність виконання наукових досліджень у даному напрямку відображена в роботах (Shuliak, 2014), (Lebedev et al., 2016).

**Висновки.** За результатами проведених досліджень обґрунтовано методологію підвищення працездатності трактора в тяговому режимі шляхом забезпечення стабільності функціональних показників. Результати досліджень дозволили сформулювати основні теоретичні та науково-практичні висновки.

1. Теоретично доказано та експериментально підтверджено, що трактор в тяговому режимі працездатний при забезпеченні стабільності тягово-швидкісних властивостей, стійкості руху і гальмування.

2. Сформульована методологія забезпечення функціональної точності трактора в тяговому режимі при оцінюванні його вихідних і вхідних параметрів. При цьому вихідний параметр є результатом розв'язання функціонального завдання відповідно до цільового призначення трактора.

3. Запропонована методика оцінювання достовірності контролю функціональної точності і працездатності трактора за помилками I роду (пропуск відмови) і II роду (помилкова відмова), реалізована на тракторі John Deere 8335R при напрацюванні 1000 м.-г. в різних умовах експлуатації.

4. Відкритим залишається питання підвищення працездатності тракторів у складі транспортно-технологічних агрегатів змінної маси, комбінованих агрегатів при виконанні різних агротехнологій, найбільш затребуваних в останній час в аграрному секторі України.

#### **Бібліографічні посилання:**

1. DSTU 2861-94. Nadiinist tekhniky. Analiz nadiinosti. Osnovni polozhennia – [Reliability of equipment. Reliability analysis. Substantive provisions]. Kyiv : Natsionalnyi standart Ukrainy, 1994. 36 p. [in Ukrainian]
2. DSTU 7463:2013. Silskohospodarska tekhnika. Traktory silskohospodarski. Klasyfikatsiia pokaznykiv – [Agricultural machinery. Agricultural tractors. Classification of indicators]. Kyiv : Natsionalnyi standart Ukrainy, 2013. 11 p. [in Ukrainian]
3. DSTU ISO 5725-1:2005. Tochnist (pravylnist i pretsyziinist) metodiv i rezultativ vymiriuvannia. Chastyna I. Osnovni polozhennia ta vyznachennia – [Accuracy (correctness and precision) of measurement methods and results. Part I. Basic provisions and definitions]. Kyiv : Natsionalnyi standart Ukrainy, 2005. 29 p. [in Ukrainian]
4. Jiahao Qin, Anbo Wu, Zhansheng Song, Zhizhu He, Chiider S. Suh, Zhongxiang Zhu, Zhen Li. Recovering tractor stability from an intensive rollover with a momentum flywheel and active steering: System formulation and scale-model verification. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 190. doi: 10.1016/j.compag.2021.106458
5. Klets D.M. Modeling of Mobile Vehicle Skid in Traction Movement Mode. *Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Lublin, 2013. Vol. 15(7). P. 156–161.
6. Lebedev A., Shuliak M., Khalin S., Lebedev S., Szwedziak K., Lejman K., Niedbała G., Łusiak T. Methodology for Assessing Tractor Traction Properties with Instability of Coupling Weight. *Agriculture*. 2023. Vol. 13(5). P. 977. doi: 10.3390/agriculture13050977
7. Lebedev A.T., Artemov M.P. Obgruntuvannia efektyvnosti vykorystannia gruntoobrobnykh mashynno-traktornykh ahrehativ modeliuvanniam partsialnykh pryskoren – [Rationalization of the effectiveness of the use of soil tillage machine-tractor units by modeling partial] / Leonid Pogorilyy Ukrainian Scientific Research Institute. *Collection of scientific papers*. 2013. Vol. 17(31). P. 280–293. [in Ukrainian]
8. Lebedev A.T., Lebedev S.A., Korobko A.I. Kvalimetriia ta metrolohichne zabezpechennia vyprobuvan traktoriv – [Qualimetry and metrological of tractors testing]. Kharkiv : Miskdruk, 2018. 394 p. [in Ukrainian]
9. Lebedev A.T., Shuliak M.L. Assessment of the stability of agricultural technologies in crop production to changes in parameters and operating modes of tractor units. *Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Lublin, 2016. Vol. 18(5). P. 53–58.

10. OECD, Code 2. Standard code for the official testing of agricultural and forestry tractor performance. Organisation for Economic Co-operation and Development. Paris, France, 2012. URL <http://www.oecd.org>

11. Shuliak M.L. Pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii enerhonasychenoho traktora v ahrehati z silskohospodarskoiu mashynoiu zminnoi masy – [Increasing the efficiency of operation of an energy tractor in a unit with an agricultural machine of variable mass]. Kharkiv : Bulletin of the KhNTUSG, 2014. Vol. 148. P. 280–286. [in Ukrainian]

12. Zhen Li, Muneshi Mitsuoka, Eiji Inoue, Takashi Okayasu, Yasumaru Hirai. Development of stability indicators for dynamic Phase I overturn of conventional farm tractors with front axle pivot. *Biosystems Engineering*. 2015. Vol. 134. P. 55–67. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2015.03.016

**Lebedev A.T.**, Doctor of Technical Science, Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

**Shuliak M.L.**, Doctor of Technical Science, Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

**Lebedev S.A.**, PhD, Director, Kharkiv branch of the Ukrainian Research Institute of Forecasting and Testing of Equipment and Technologies for Agricultural Production named after Leonid Pohorily, Kharkiv, Ukraine, Kharkiv, Ukraine

**Shaposhnyk V.S.**, PhD student, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

**Podliesnyi A.V.**, PhD student, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

**Formation of a methodology for improving the performance of a tractor in the traction mode under unstable state parameters**

*The article discusses the problems of improving the performance of a tractor under unstable state parameters. The performance of a tractor is characterized not only by its ability to work (perform the assigned functions), but also by compliance with regulatory, technical, and design documentation. Taking into account that ensuring the stability of the tractor's operation in the traction mode is the basis for improving its performance, the study presents a methodology for ensuring the accuracy of its operation under unstable state parameters. In accordance with the current Ukrainian regulatory documents, the functional indicators include the traction-speed properties of the tractor in the traction mode, the stability of movement and braking. Using a measuring and recording complex developed on the basis of the method of partial accelerations, with the participation of the authors of this article, the functional indicators of the John Deere 8335R and John Deere 8430R tractors were evaluated when performing various agricultural technologies. The maximum error when comparing theoretical and experimental results does not exceed 5%. Existing methods and means for assessing the functional indicators of tractors when aggregated with mounted, trailed, etc., agricultural machines, which are based on dynamometric devices, are not acceptable for assessing the performance of tractors in various operating conditions. The issue of improving the performance of tractors as part of variable-mass transportation and technological units, combined units when performing various agricultural technologies, which are currently in the highest demand in Ukraine's agricultural sector, remains open. Based on the results of the research, a methodology for improving the performance of a tractor in traction mode by ensuring the stability of functional indicators has been substantiated. It has been theoretically proven and experimentally confirmed that a tractor in traction mode is efficient when the stability of traction and speed properties, stability of movement and braking is ensured. A methodology for ensuring the functional accuracy of a tractor in traction mode when evaluating its output and input parameters has been formulated. A technique for assessing the control reliability of functional accuracy and the performance of a tractor by errors of the first kind (failure to pass) and the second kind (false failure) has been proposed.*

**Key words:** tractor, traction mode, functional indicators, state instability, measurement accuracy, control reliability, performance.