

МЕТОДОЛОГІЯ ФОРМУВАННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ТРАКТОРА У ЗМІННИХ ПАРАМЕТРАХ СТАНУ

Лебедєв А., д-р техн. наук, проф.,

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

Сумський національний аграрний університет;

Лебедєв С., канд. техн. наук,

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

Харківська філія ДНУ «УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого»

Коробко А., д-р техн. наук, доц.,

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

Харківська філія ДНУ «УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого»,

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Войновский В.,

e-mail: vladimir.voinovs@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-9994-2617>

ДНУ «УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого»

Анотація

Мета дослідження полягає у формуванні методології працездатності трактора у змінних параметрах стану.

Методи дослідження. Методологічною основною дослідження є узагальнення та аналіз відомих наукових результатів працездатності трактора в певних умовах експлуатації. Для формування наукової проблеми, визначення мети і постановки завдань дослідження використовувався аналітичний метод і порівняльний аналіз. Для створення емпіричних моделей використані основні положення працездатності технічних систем при змінних параметрах стану.

Результати дослідження. Враховуючи, що працездатність трактора оцінюється сукупністю якісних і кількісних характеристик його властивостей, дослідження виконано як багатовимірною технічною системою у просторі стану. При цьому трактор розглядається як система з запізненням, для якої обґрунтована умова стабільності її функціонування при забезпеченні нормативів експлуатаційної технологічності.

Висновок. Тракторний агрегат буде працездатним, тобто виконуватиме задані функції, якщо його технічний стан забезпечує зміна координат швидкості і напрямку руху та глибини ходу робочого органа ґрунтообробного сільгоспзаснаряддя в межах, обумовлених нормативно-технічною документацією. При цьому працездатні всі системи трактора, а при непрацездатності хоч би однієї системи трактор є непрацездатним. У ході дослідження обґрунтовано доцільність використання динамічних моделей для прогнозування стану трактора та корекції режимів його роботи. Розроблена методологія діагностики й оцінювання працездатності охоплює як технічні параметри, так і контекстні. Упровадження запропонованої методології дає змогу оперативно реагувати на зміни стану трактора, оптимізувати технологічні процеси та забезпечити економічну ефективність сільськогосподарського виробництва. На основі результатів досліджень і досвіду інших країн обґрунтована необхідність запровадження в Україні окремого нормативно-правового акта, яким регламентувалися б вимоги і процедури оцінки відповідності для одиночних зразків тракторів, уживаних, а також самостійно складених, куплених на вторинному ринку, оскільки процедури та вимоги Технічного регламенту затвердження типу не можуть бути застосовані до таких тракторів.

Ключові слова: трактор, працездатність, змінний стан, режим роботи, експлуатаційна технологічність, надійність, експлуатаційні властивості, випробування.

Вступ. Працездатність — стан трактора, при якому значення всіх параметрів, що характеризують його здатність виконувати задані функції, відповідають вимогам нормативно-технічної документації [Endrenyi, 2011; Гуцаленко & П'ясецький, 2016; Galiev et al., 2024]. Для забезпечення відповідності означених параметрів необхідно обґрунтовувати нові методи оцінки працездатності тракторів, що будуть адаптовані до відповідного рівня техніки.

Відомі методи оцінки працездатності тракторів базуються, в основному, на нормативних матеріалах визначення допустимого відхилення параметрів технічного стану і прогнозування залишкового ресурсу його агрегатів [Черновол та ін., 2009; Самородов та ін., 2015; Latino, 2020; Napiorkowski & Gonera, 2020; Siddique et al., 2022]. При цьому технічний стан трактора оцінюється в ході діагностування сукупністю якісних і кількісних характеристик його властивостей, що розглядаються в певних умовах експлуатації з урахуванням вимог, що висуваються. На кінцевому етапі діагностування визначається технічний стан трактора, однак немає можливості оцінити взаємозв'язок технічного стану трактора з його функціонуванням, тобто працездатністю [Ільченко та ін., 1993; Ge, 2010].

Постановка завдань. Метою дослідження є обґрунтування методології оцінки працездатності трактора при змінних параметрах стану.

Методи і матеріали. Методологічною основою роботи є узагальнення та аналіз відомих наукових результатів працездатності трактора та прогнозування його залишкового ресурсу. Для формування наукової проблеми, визначення мети і постановки завдань дослідження використовувався аналітичний метод і порівняльний аналіз. Для створення емпіричних моделей

використані основні положення працездатності тракторів.

Результати. Стан трактора у момент часу t_o — це такий мінімальний набір відомостей про техніко-експлуатаційні показники, інформації якого разом із деякою вхідною функцією $U(t)$, заданою для інтервалу часу $t_o \leq t \leq t_k$, достатньо для однозначного визначення єдиної вихідної функції $y(t)$ для $t_o \leq t \leq t_k$, $t_k \geq t_o$.

Для характеристики стану трактора введена сукупність змінних $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$, ..., $x_n(t)$. Знання початкових значень $x_1(0)$, $x_2(0)$, $x_3(0)$, ..., $x_n(0)$ і вхідної дії $U(t)$ дає змогу однозначно визначити майбутній рух системи. Ці змінні $U(t)$ називаються змінними стану [Douglas & Williams, 2007].

З метою оцінки працездатності трактора при змінних параметрах стану в Харківській філії УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого проведені випробування трактора «ХТЗ-17221» у ході виконання найбільш енергоємного технологічного процесу глибокого обробітку ґрунту (рис. 1) [Лебедев & Лебедев, 2021].

На зміну стану трактора у складі ґрунтообробного агрегату «ХТЗ-17221» + «ГРУ-2,5» основний вплив має швидкість, оптимальна за продуктивністю (v_w). Вважаючи, що протягом зміни складу



Рисунок 1 – Виконання технологічного процесу глибокого обробітку ґрунту агрегатом «ХТЗ-17221» + глибокорозпушувач «ГРУ-2,5» (Франк-2,5)

агрегата ($B_p = \text{const}$), можна вважати, що на тракторний агрегат як об'єкт оптимізації за продуктивністю впливають дві змінні: швидкість агрегата v , час t .

Для цього випадку функціонал оптимізації v_w записується у вигляді:

$$J = \int_{t_0}^t W_{em}(v; t) dt, \quad (1)$$

де $W_{em} = 0,1 B_v \cdot T_p$; T_p – чистий робочий час за зміну, год.

Рішення цього функціонала зручно методами варіаційного обчислення [Моклячук, 2009], перетворивши його у рівняння Ейлера:

$$\frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial W_{em}}{\partial v} = 0, \quad (2)$$

за (2) отримаємо умову вибору оптимальної за продуктивністю швидкості тракторного агрегата (критерій оптимальності):

$$\frac{\partial W_{em}}{\partial v} = \text{tg} \alpha = C_w, \quad (3)$$

де α – кут нахилу дотичної до $W_{em} = f(v)$; $C_w = \text{const}$ – коефіцієнт оптимальності продуктивності агрегата.

Отже, виробіток тракторного агрегата за зміну буде найбільшим, якщо швидкість агрегата обрана за умови збереження постійного відношення прирощення продуктивності агрегата до прирощення швидкості (рис. 2).

Аналіз виробітку агрегата «ХТЗ-17221» + «ГРУ-2,5» свідчить, що зона оптимальних швидкостей v_w за продуктивністю залежно від глибини обробітку знаходиться у межах 4,5-6,5 км/год., причому нижня межа відноситься до більших глибин обробітку, верхній – до менших. Зі зміною глибини обробітку ґрунту оптимальна швидкість v_w визначається перетинанням кривої АБ, для якої критерій оптималь-

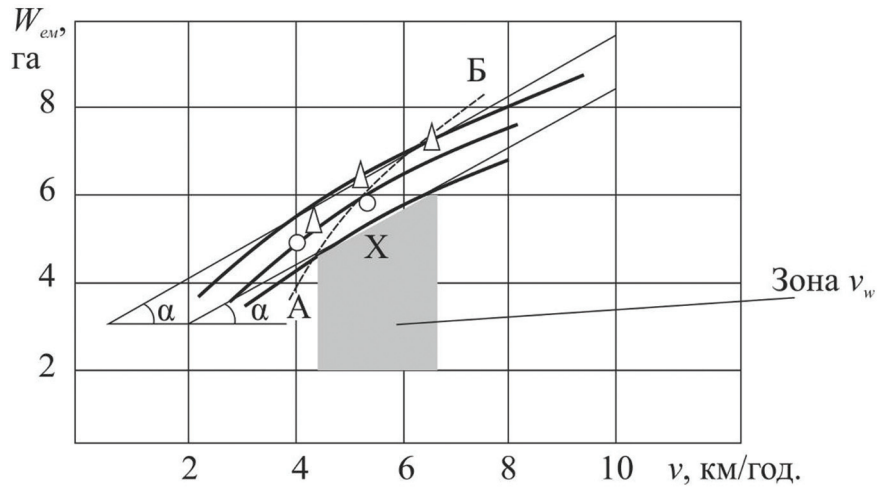


Рисунок 2 – Експериментальні залежності змінного (5 годин) виробітку W_{em} трактора «ХТЗ-17221» при агрегуванні з глибокорозпушувачем «ГРУ-2,5» від швидкості руху v при розпушуванні стерні озимої пшениці на глибину:
 $\Delta \dots \Delta$ – 20-22 см; $O \dots O$ – 25-27 см; $X \dots X$ – 27-30 см

ності C_w має постійне значення з кривою виробітку агрегата за зміну.

У ході експлуатації трактора на транспортних роботах вирішується завдання забезпечення його функціонування в одній із двох областей: $ОФ$ – область функціонування, в якій трактор працює відповідно до призначення (забезпечується необхідне тягове зусилля, стійкість напрямку руху й ефективність гальмування тощо); $ОО$ – область оптимальної роботи, наприклад, за критерієм енергозбереження, в якій трактор працює при допустимій зміні швидкості руху (зміна прискорення руху в допустимих межах) (рис. 3).

Кожна точка $ОФ$ характеризує певний режим роботи трактора в даний момент і описується певним поєднанням значень функціональних параметрів, які характеризуються швидкістю руху $v(t)$, стійкістю напрямку руху $y_n(t)$ і ефективністю гальмування $y_z(t)$. Відхилення точки B_g від точки B_y відображує запас оптимального функціонування Δ_v трактора, який визначається за формулами:

$$\Delta B_z = \frac{Z_{jk} - Z_{jn}}{Z_{jn}} = \frac{\Delta Z_j}{\Delta Z_{jn}};$$

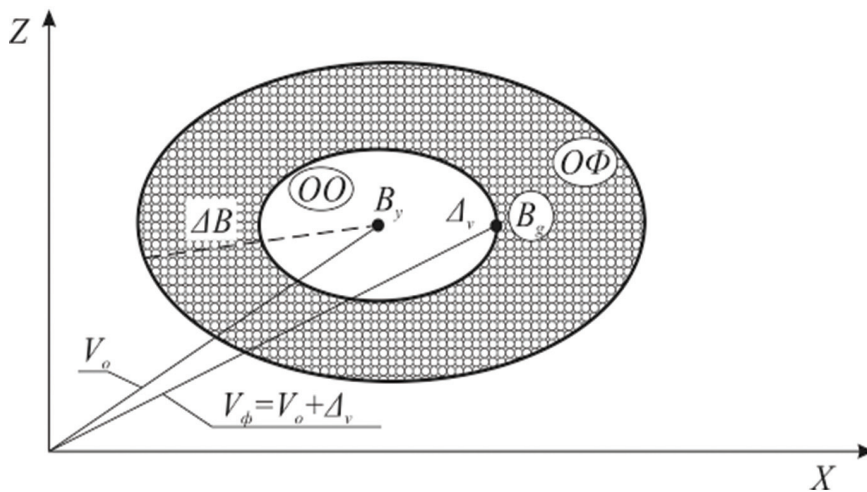


Рисунок 3 – Співвідношення областей оптимальної роботи (ОО) та функціонування (ОФ) трактора:

Δ_v – запас оптимального функціонування; V_o , V_ϕ – вектора функціонування оптимальний, фактичний; ΔB – запас функціонування в ОФ

тобто $V_\phi = V_o + \Delta_v$. У цьому випадку для забезпечення роботи трактора в оптимальній області ОО (за рис. 2.4) необхідно забезпечити вибір таких номінальних значень функціональних параметрів і також полів допусків для них, при яких забезпечувалося б положення полів розкиду і виходів у цій області.

Вводячи номінальний вектор V_o (компоненти вектора відповідно дорівнюють X_{oi}^c і X_{oj}^c) і вектор Δ_v (за рис. 3), маємо:

$$V_o = \begin{bmatrix} X_o^c \\ X_v^c \end{bmatrix}; \Delta_v = \begin{bmatrix} \Delta^c \\ \Delta^v \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Заданому номінальному вектору V_o і заданому діапазону допусків $\Delta_{v_n} \leq \Delta_e \leq \Delta_{v_e}$ відповідає замкнута допускова область ОО (рис. 3) оптимального функціонування трактора в просторі параметрів. Будь-яка точка ОО є набором можливих значень усіх змінних функціональних параметрів трактора, що містяться в області ОФ.

За цією методикою можна оцінити роботу трактора за одним функціональним параметром, діапазон якого розбивається на три рівні: Δy_0 , Δy_1 , Δy_2 (рис. 4).

За цим рисунком трактор буде функціонально стабільний, якщо $y(t)$ (функціональний параметр) знаходиться в інтервалі квантування $(a, b) = \Delta y_i$, $i = 0, 1, 2$.

При прогнозуванні функціональна стабільність трактора визначається інтенсивністю v_i перетину $y(t)$ рівня квантування Δy . Для такого випадку прогнозування ймовірності перебування трактора в оптимальній області функціонування ОО (рис. 3) в момент часу t , визначається рів-

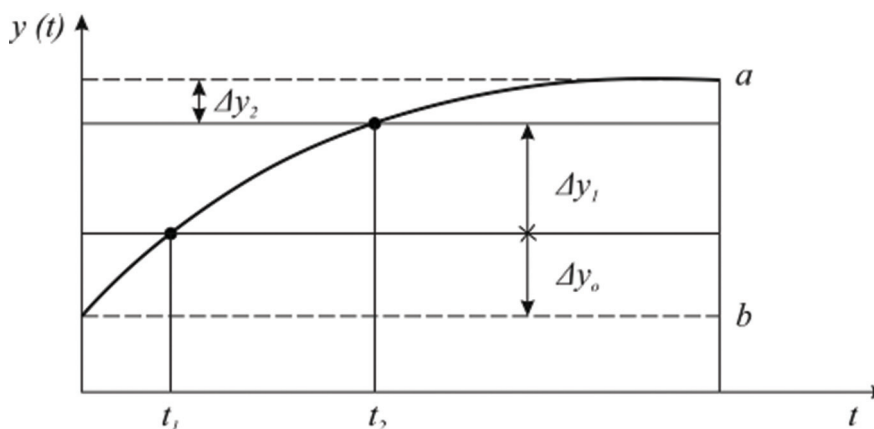


Рисунок 4 – Квантування одного функціонального параметра трактора за рівнями

$$\Delta B_x = \frac{X_{ik} - X_{in}}{X_{in}} = \frac{\Delta X_i}{\Delta X_{in}}, \quad (4)$$

де Z_{jk} , Z_{jn} ; X_{ik} , X_{in} – критичні значення досліджуваного і граничного параметрів за координатами X , Z ;

ΔZ_j , ΔX_j – запас оптимального функціонування трактора за координатами Z і X при їхніх відхиленнях від номінальних значень на величини ΔZ_{jn} і ΔX_{in} .

Запас оптимального функціонування Δ_v трактора визначає відхилення вектора функціонування V_ϕ , компонентами якого є фактичні значення функціональних параметрів, від номінального вектора V_o ,

няннями марківського процесу:

$$P_i = v_i P_i(t) + v_{i-1} P_{i-1}(t) \quad (6)$$

за номінальних умов $i = 0, 1, 2, 3$; $t_0 = 0$;
 $P_i(t) = P_i$.

При оцінці функціональної стабільності трактора лише за одним параметром, наприклад, за швидкістю руху $v(t)$, його функціонування може бути оцінено функцією $\vec{x}_v = (v_1, \dots, v_n)$. Вектору $\vec{x}_v$ відповідає число $R(\vec{x}_v)$, причому $R(\vec{x}_v) > 0$ і зростає до ∞ при

$\vec{x}_v \rightarrow \vec{V} = (V_1, \dots, V_n)$, де $\vec{V}$ – критичний вектор. $R(\vec{x}_v) \rightarrow \infty$ і при $v_i \rightarrow V_i$. У цьому випадку $R(\vec{x}_v) = [N_i(\vec{x}_v)]^{\pm 1} / [Z(\vec{x}_v)]^2$, де $i = 1, 2$; $a > 0$ – довільне число;

$$Z(\vec{x}_v) = \prod_{i=1}^n |v_i - V_i|^{q_i};$$

$$N_i(\vec{x}_v) = \sum_{i=1}^n \alpha_i |v_i - V_i|;$$

$\alpha_i > 0$ – коефіцієнт ваги v_i ; $q_i > 0$ – довільне число.

При $q = 1/(n-1)$, $q > a > 1$ можна записати:

$$R(\vec{x}_v) = \sum_{i=1}^n \alpha_i |v_i - V_i| \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n (v_i - V_i)}. \quad (7)$$

У цьому випадку функціональна стабільність трактора за параметром $v(t)$ оцінюється за залежністю:

$$H(\vec{x}_v) = 1 / R(\vec{x}_v). \quad (8)$$

Ця залежність характеризує функціонування трактора за умови досягнення v_i значення V_i при зміні $H(\vec{x}_v)$ в межах від H_{max} до 0 (при $v_i = V_i$), характеризуючи функціональну стабільність трактора за швидкістю руху $v(t)$.

Тракторний агрегат буде працездатним, тобто виконуватиме задані функції, якщо його технічний стан забезпечує зміна координат швидкості $v(t)$, напрямку руху $y(t)$ і глибини ходу робочого органа сільгоспзнаряддя $z(t)$ в межах, обумовлених нормативно-технічною документацією. При цьому працездатні всі системи,

що входять у трактор, а при непрацездатності хоч би однієї системи трактор є непрацездатним. При зміні технічного стану трактора координати v , y , z наближаються до деяких граничних значень, при яких трактор буде непрацездатним, тобто $\vec{x}_v = (v_i, \dots, v_n; y_i, \dots, y_n; z_i, \dots, z_n)$. У цьому випадку вектор $\vec{x}_v$ буде характеризувати працездатність трактора.

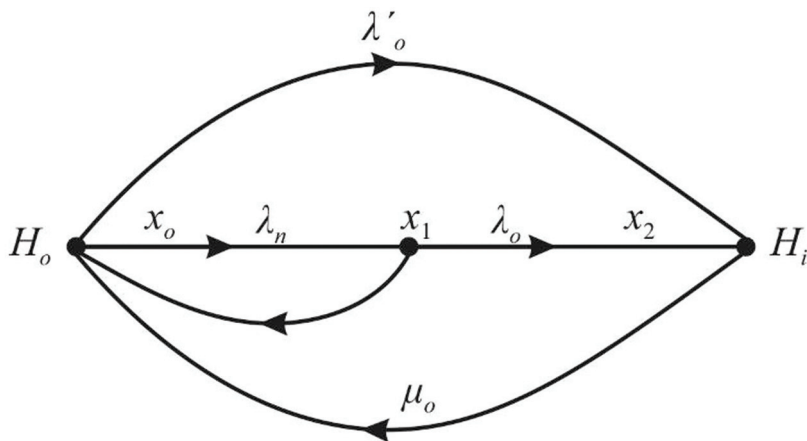
У ході оцінювання працездатності трактора критичні значення векторів швидкості руху $\vec{v}$, стійкості прямолінійного руху $\vec{y}$ і глибини руху робочого органа $\vec{z}$ зазвичай вибираються за експериментальними даними. Так, $\vec{v}$ вибирається, виходячи з оптимального завантаження двигуна $x = 0,95$ на енергоємних роботах; вектор $\vec{y}$ оцінюється запасами стійкості прямолінійного руху, наприклад, для трактора з шарнірно-зчленованою рамою на оранці, за фазою $\Delta\Phi \geq 15^\circ$ і за амплітудою $\Delta L \geq 12$ дБ; вектор $\vec{z}$ обґрунтовується агротехнічними вимогами, наприклад, при силовому регулюванні орного агрегата допустимий коефіцієнт варіації для глибини оранки повинен бути не більше $V_{don} \leq 15\%$.

Складовою частиною працездатності трактора є його експлуатаційна технологічність, що визначається організацією та якістю проведення технічного обслуговування і ремонтів, кваліфікацією та комплектністю штату виконавців, організацією зберігання тракторів тощо [Harianton et al., 2023].

Обговорення. Від рішення проблеми експлуатаційної технологічності тракторів істотно залежить їхня працездатність і ефективність використання у сільськогосподарському виробництві.

Ряд закордонних авторів вивчали питання працездатності трактора з використанням альтернативних інструментів, окрім технологічності, зокрема [Durczak & Selech, 2022; Durczak et al., 2022; Zhi-Lin et al., 2022]. Однак, на нашу думку, експлуатаційна технологічність залишається перспективним методом оцінювання працездатності тракторів.

У ході оцінки працездатності тракто-



Рисунк 5 – Граф переходів трактора зі стану працездатності (H_o) у стан непрацездатності (H_i):

λ_n, λ_o – інтенсивності пошкодження, відмови; μ_n, μ_o – інтенсивності відновлення пошкодження, відмови; λ'_o – інтенсивність раптової відмови

ра його можна розглядати як систему, що складається з n елементів, що відновлюються (двигун і його системи, трансмісія, рульове керування, гальмівна система тощо), інтенсивності пошкоджень λ_{ni} , відмов λ_{oi} й відновлення μ_{ni} , μ_{oi} , які залежать як від виду робіт трактора, так і від періодичності технічного обслуговування (ТО). При відмові елементів трактора, коли порушується його працездатність, необхідна його зупинка, ремонт, процес функціонування трактора може бути описаний графом переходів зі стану працездатності H_o у стан непрацездатності H_i (рис. 5).

Узагальнено граф переходів має три основні стани: x_o – трактор справний; x_1 – наявність пошкодження; x_2 – наявність відмови.

Зазвичай більшість відмов трактора є наслідком пошкодження його елементів. У цьому випадку зі стану x_o можливий перехід тільки у стан x_1 , а із x_1 – у стан x_2 .

У початковий момент часу x_o трактор знаходиться у стані працездатності H_o та має нульове напрацювання, а перехід його у стан x_1 здійснюється за випадковим напрацюванням із функцією розподілення $F_1(t)$ і у стан x_2 – з $F_2(t)$. Зазвичай $F_2(t)$ не залежить від $F_1(t)$. Трактор при напрацюванні t у моменти обслуговування τ , 2τ , ..., $k\tau$ може знаходитися або у стані x_o , при якому не проводиться ТО та ремонт,

або у станах x_1 та x_2 , із яких трактор переводиться у стан x_o шляхом ТО та ремонту з інтенсивністю відновлення μ_o і μ_n . Цей напрямок досліджень за експлуатаційною технологічністю тракторів не отримав широкого висвітлення у технічній літературі.

Проблема підвищення ефективності агропромислового виробництва в Україні в умовах слабкого оснащення високопродуктивними засобами механізації є однією з пріоритетних задач. В умовах інтенсивно-

го морального та матеріального старіння, а також зниження надійності істотного значення набуває розвиток і ефективне функціонування вторинного ринку.

За результатами аналізу УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого [Цема та ін., 2021] визначено, що у 2020 р. в Україні зареєстровано й поставлено на облік 29001 трактор, із них близько 59% – трактори, термін експлуатації яких становить не більше 3-х років, для 50% тракторів термін експлуатації – від 4 до 40 років і навіть до 60 років – для 1% тракторів. Найбільшим попитом на ринку України користувалися трактори загального призначення українського виробництва (6,0 %), «New Holland» (4,4%), «John Deere» (3,0%) та інші (1,0%).

Вторинний ринок тракторів в Україні знаходиться на стадії становлення, коли оцінюється насамперед працездатність, що характеризується не лише здатністю працювати (виконувати необхідні функції), але й відповідати нормативно-технічній і конструкторській документації. Зараз в Україні продаються та купляються, в основному, вживані трактори загального призначення серії «ХТЗ-170» і перепродуються трактори «John Deere» серії 8R, при придбанні яких прогнозується їхня працездатність при пошкодженнях, що полягає у порушенні справності трактора

при збереженні його працездатності. Особливості будови та експлуатації основних моделей тракторів «John Deere,» їхні технічні та експлуатаційні характеристики, а також технічне обслуговування та заходи безпеки систематизовані у підручнику [Лебедев та ін., 2024].

Висновки. Методологічною основою роботи є узагальнення та аналіз наукових результатів працездатності трактора та прогнозування його залишкового ресурсу. При цьому виробіток тракторного агрегата буде найбільшим, якщо швидкість агрегата обрана за умови збереження постійного відношення приросту продуктивності агрегата до прирощення швидкості. Тракторний агрегат буде працездатним, тобто буде виконувати задані функції, якщо його технічний стан забезпечує зміна координат швидкості і напрямку руху та глибини ходу робочого органа ґрунтообробного сільгоспзнаряддя в межах, обумовлених нормативно-технічною документацією. При цьому працездатні всі системи, що входять у трактор, а при непрацездатності хоч би однієї системи трактор не буде працездатним.

У ході дослідження обґрунтовано доцільність використання динамічних моделей для прогнозування стану трактора та корекції режимів його роботи. Розроблена методологія діагностики та оцінювання працездатності охоплює як технічні параметри, так і контекстні. Упровадження запропонованої методології дає змогу оперативно реагувати на зміни стану трактора, оптимізувати технологічні процеси та забезпечити економічну ефективність сільськогосподарського виробництва.

На основі результатів досліджень і досвіду інших країн обґрунтована необхідність запровадження в Україні окремого нормативно-правового акта, яким регламентувалися б вимоги і процедури оцінки відповідності для одиночних зразків тракторів, уживаних, а також самостійно складених, куплених на вторинному ринку, оскільки процедури та вимоги Технічного регламенту затвердження типу не можуть бути повністю застосовані до таких тракторів.

Перелік посилань

Гуцаленко, О.В., & П'ясецький, А.А. (2016). Техніко-експлуатаційні характеристики сільськогосподарських тракторів іноземного виробництва. Довідник для фахівців з механізації сільського господарства та студентів вищих аграрних закладів. Вінниця: ВНАУ. 104 с.

Ільченко, В.Ю., Карасьов, П.І., & Лімонт, А.С. (1993). Експлуатація машинно-тракторного парку в аграрному виробництві. К.: Урожай, 288 с.

Лебедев, А.Т., Шуляк, М.Л., Зубко, В.М., & Лебедев, С.А. (2024). Трактори John Deere. Особливості будови, експлуатація. За ред. А.Т. Лебедева. Суми: ФОП Цьома. 208 с.

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

Моклячук, М.П. (2009). Варіаційне числення. Екстремальні задачі. Підручник. К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет». 380 с.

Самородов, В.Б., Краснокутський, В.М., & Мандрика, В.Р. (2015). Надійність в автомобіле- і тракторобудуванні: підручник. Х.: НТУ «ХПІ», 352с.

Цема, Т., Афанасьева, С., & Рижкова, С. (2021). Дослідження елементів технічного регулювання щодо введення в обіг та в експлуатацію сільськогосподарських і лісгосподарських тракторів. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. 29 (43). С. 14-28. [http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2021-1-29\(43\)-1](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2021-1-29(43)-1)

Черновол, М.І., Черкун, В.Ю., Аулін, В.В., Солових, Є.К., Гранкін, С.Г., & Гранкіна, О.В. (2009). Надійність сільськогосподарської техніки: Підручник. Друге видання, перероблене і доповнене/ За ред. М.І. Чорновола. Кіровоград, 2009. 289 с.

Durczak, K. & Selech, J. (2022). The Quantification of Operational Reliability of Agricultural Tractors with the Competing

Risks Method. *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*. 29. 628-633. DOI: 10.17559/TV-20201118115902.

Durczak, K., Selech, J., Ekielski, A., Żelaziński, T., Waleński, M. & Witaszek, K. (2022). Using the Kaplan-Meier Estimator to Assess the Reliability of Agricultural Machinery. *Agronomy*. 12 (6), 1364. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061364>

Endrenyi, J. (2011). The Present Status of Maintenance Strategies and the Impact of Maintenance on Reliability. A Report of the Probability Application Subcommittee. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 16. 4. 638–646.

Galiev, I. G., Ziganshin, B. G., Kalimullin, M. N., & Valeeva, Y. S. (2024). Theoretical prerequisites for improving the efficiency of tractor operation in agriculture. In 2024 9th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE) (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EEAE60309.2024.10600525>

Ge, H. (2010). Maintenance optimization for substations with aging equipment: a dissertation for the degree of Phd. Lincoln, Nebraska. 212 p.

Harianton, I. & Saefudin, A. & Suparman, M. (2023). Design and manufacture of a wheel tractor for medium size work rice farming. *International Journal of Advances in Applied Sciences*. 12. 82. <https://doi.org/10.11591/ijaas.v12.i1.pp82-92>

Latino, M. A. (2020). Behavioral based reliability. *Machinery Reliability Conference*. 2020. April. <http://reliability.com/industry/articles/article36.pdf>.

Napiorkowski, J. & Gonera, J. (2020). Analysis of Failures and Reliability Model of Farm Tractors. *Agricultural Engineering*. 24. 89-101. <https://doi.org/10.1515/agriceng-2020-0020>

Siddique, M. A., Kim, Y., Baek, S., Baek, S., Han, T., Kim, W., Kim, Y., Lim R., & Choi, Y. (2022). Development of the Reliability Assessment Process of the Hydraulic Pump for a 78 kW Tractor during Major Agricultural Operations. *Agriculture*, 12 (10), 1609. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101609>

Zhao, Z. L., Yu, H. J., & Cheng, F. (2022). An analysis of factors affecting agricultural tractors' reliability using random survival forests based on warranty data. *IEEE Access*, 10, 50183-50194. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3172348>

References

Chernovol, M.I., Cherkun, V.Yu., Aulin, V.V., Solovykh, E.K., Grankin, S.G., & Grankina, O.V. (2009). Reliability of agricultural machinery: Textbook. Second edition, revised and supplemented / Edited by M.I. Chornovol. Kirovograd, 2009. 289 p.

Durczak, K. & Selech, J. (2022). The Quantification of Operational Reliability of Agricultural Tractors with the Competing Risks Method. *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*. 29. 628-633. DOI: 10.17559/TV-20201118115902.

Durczak, K., Selech, J., Ekielski, A., Żelaziński, T., Waleński, M. & Witaszek, K. (2022). Using the Kaplan-Meier Estimator to Assess the Reliability of Agricultural Machinery. *Agronomy*. 12 (6), 1364. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061364>

Endrenyi, J. (2011). The Present Status of Maintenance Strategies and the Impact of Maintenance on Reliability. A Report of the Probability Application Subcommittee. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 16. 4. 638–646.

Galiev, I. G., Ziganshin, B. G., Kalimullin, M. N., & Valeeva, Y. S. (2024). Theoretical prerequisites for improving the efficiency of tractor operation in agriculture. In 2024 9th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE) (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EEAE60309.2024.10600525>

Ge, H. (2010). Maintenance optimization for substations with aging equipment: a dissertation for the degree of Phd. Lincoln, Nebraska. 212 p.

Gutsalenko, O.V. & P'yasetsky, A. A. (2016). Technical and operational characteristics of agricultural tractors of foreign production. Handbook for specialists in agricul-

tural mechanization and students of higher agricultural institutions. Vinnytsia: VNAU. 104 p.

Harianton, I. & Saefudin, A. & Suparman, M. (2023). Design and manufacture of a wheel tractor for medium size work rice farming. *International Journal of Advances in Applied Sciences*. 12. 82. <https://doi.org/10.11591/ijaas.v12.i1.pp82-92>

Ilchenko, V.Yu., Karasev, P.I., & Limont, A.S. (1993). Operation of machine and tractor fleet in agricultural production. K.: Urozhay, 288 p.

Latino, M. A. (2020). Behavioral based reliability. *Machinery Reliability Conference*. 2020. April. <http://reliability.com/industry/articles/article36.pdf>.

Lebedev, S., & Lebedev, A. (2021) Technological adaptation of general-purpose tractors. *Engineering and Technologies of the Agricultural Industry*. No. 4 (121). P. 17-21.

Lebedev, A.T., Shulyak, M.L., Zubko, V.M., & Lebedev, S.A. (2024). John Deere tractors. Structural features, operation. Edited by A.T. Lebedev. Sumy: FOP Tsoma. 208 p.

Moklyachuk, M. P. (2009). Calculus of Variations. Extreme Problems. Textbook. K.: Publishing and Printing Center “Kyiv University”. 380 p.

Napiorkowski, J. & Gonera, J. (2020). Analysis of Failures and Reliability Model

of Farm Tractors. *Agricultural Engineering*. 24. 89-101. <https://doi.org/10.1515/agriceng-2020-0020>

Samorodov, V.B., Krasnokutsky, V.M., & Mandryka, V.R. (2015). Reliability in Automobile and Tractor Manufacturing: Textbook. Kh.: NTU “KhPI”, 2015. 352 p.

Siddique, M. A., Kim, Y., Baek, S., Baek, S., Han, T., Kim, W., Kim, Y., Lim R., & Choi, Y. (2022). Development of the Reliability Assessment Process of the Hydraulic Pump for a 78 kW Tractor during Major Agricultural Operations. *Agriculture*, 12 (10), 1609. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101609>

Tsema, T., Afanasyeva, S., & Ryzhkova, S. (2021). Research on the Elements of Technical Regulation for the Introduction and Operation of Agricultural and Forestry Tractors. *Technical and Technological Aspects of Development and Testing of New Equipment and Technologies for Agriculture of Ukraine*. Vol. 29 (43). 14-28. [http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2021-1-29\(43\)-1](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2021-1-29(43)-1)

Zhao, Z. L., Yu, H. J., & Cheng, F. (2022). An analysis of factors affecting agricultural tractors' reliability using random survival forests based on warranty data. *IEEE Access*, 10, 50183-50194. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3172348>

UDC 629.114.2

METHODOLOGY OF FORMING TRACTOR PERFORMANCE IN VARIABLE STATE PARAMETERS

Lebedev A., Doctor of Eng. Sc., Prof.,

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

Sumy National Agrarian University

Lebedev S., Ph. D.,

e-mail: [hfukrndipvt@gmail.com](mailto:hfuksndipvt@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-3067-5135>

Kharkiv branch of L. Pogorilyy UkrNDIPVT

Korobko A., Doctor of Tech. Sc., Associate Professor,

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

Kharkiv branch of L. Pogorilyy UkrNDIPVT;

Kharkiv National Automobile and Highway University

Voinovskiy V.,

e-mail: vladimir.voinovs@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-9994-2617>

L. Pogorilyy UkrNDIPVT

Summary

The purpose of this study is to develop a methodology for assessing tractor performance under variable state parameters.

Research methods. The methodological basis of the study is the generalization and analysis of existing scientific results regarding tractor performance under specific operating conditions. To form a scientific problem, determine the goal and set the research objectives, the analytical method and comparative analysis were used. When creating empirical models, the basic provisions of the performance of technical systems in variable state parameters were used.

Research results. Considering that the performance of a tractor is assessed by a set of qualitative and quantitative characteristics of its properties, the study was carried out as a multidimensional technical system in state space. In this case, the tractor is considered as a system with a delay, for which the condition of stability of its functioning is justified while ensuring the standards of operational manufacturability.

Conclusion. The tractor will be operational if its technical condition ensures its stable movement within the limits stipulated by the regulatory and technical documentation. An integral part of the tractor's operational capability is its operational manufacturability, which is determined by the organization and quality of maintenance and repair. The need to introduce a separate regulatory act in Ukraine that would regulate the requirements and procedures for assessing compliance with the standards of used tractors purchased on the secondary market is justified. The study substantiated the feasibility of using dynamic models to predict the tractor's condition and correct operating modes. The developed methodology for diagnostics and performance assessment includes both technical and contextual parameters. The implementation of the proposed methodology allows for prompt response to changes in the tractor's condition, optimization of technological processes, and ensuring the economic efficiency of agricultural production. Based on the results of research and the experience of other countries, the need to introduce a separate regulatory legal act in Ukraine that would regulate the requirements and procedures for assessing conformity for single tractor samples, used, as well as self-assembled ones purchased on the secondary market, is justified, since the procedures and requirements of the Technical Regulation on Type Approval (CMU Resolution No. 1367 of 28.12.2011) cannot be fully applied to such tractors.

Keywords: tractor, operational capability, variable state, operating mode, operational manufacturability, reliability, performance properties, testing.