

ДИНАМІЧНА АДАПТАЦІЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТРАКТОРА У ЗМІННИХ СТАНАХ

Лебедєв А., д-р техн. наук, проф., tiaxntusg@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-1975-3323>

Сумський національний аграрний університет;

Лебедєв С., канд. техн. наук, директор, hfukrndipvt@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-3067-5135>

Харківська філія ДНУ «УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого»

Росул Р., доц., канд. техн. наук,
<https://orcid.org/0009-0008-6855-4612>

Мукачівський державний університет

Анотація

Мета дослідження – підвищення безпеки використання тракторів шляхом покращення їхньої керованості за рахунок обґрунтування методології оцінки керованості трактора у просторі станів.

Методи дослідження. Методологією дослідження обрано метод парціальних прискорень, в основу якого покладена залежність прискорення руху трактора від тягового навантаження. Методика дослідження базується на адаптивній динамічній стабілізації забезпечення стійкості й керованості трактора в процесі руху з використанням вимірювально-реєстраційного комплексу для контролю прискорень тракторного агрегата, розробленого за участі авторів цієї статті.

Результати. Доведена можливість оцінювання за станом системи керування трактора за мінімальних відомостей про її поведінку та обґрунтованості зони стійкості й керованості тракторного агрегата. Для оцінювання динаміки системи керування трактора ефективно використовувати метод змінних станів, відповідно до якого тракторний агрегат розглядається як багатовимірний динамічний об'єкт. За напівавтоматичного керування закордонними тракторами з тривалим користуванням системи керування умова стійкості роботи тракторного агрегата зберігається у всьому діапазоні зміни його динамічних параметрів.

Висновок. Для оцінювання динамічної адаптації системи керування трактора ефективно використовувати метод змінних станів, відповідно до якого тракторний агрегат розглядається як багатовимірний динамічний об'єкт з керованими і некерованими вхідними змінними. Теоретично обґрунтована й експериментально підтверджена зона стійкості і керованості тракторного агрегата від збурювальних сил і сил опору. Доведено ефективність експериментального дослідження з оцінювання керованості та стійкості руху ґрунтообробного агрегата із застосуванням вимірювально-реєстраційного комплексу, розробленого за участі авторів цієї статті. Напівавтоматичне керування тракторним агрегатом не отримало належного висвітлення в технічній літературі, що можна пояснити, в основному, можливістю дій водія лише на тракторах закордонного виробництва.

Ключові слова: трактор, змінні стани, система керування, динамічна адаптація, парціальне прискорення.

Вступ. Міжнародним кодексом стандартів OECD [OECD, 2012] регламентовано випробування тракторів щодо оцінювання їхньої керованості шляхом визначення характеристик кінематичних і силових реакцій трактора на керуючі впливи (поворот рульового колеса). На сьогодні є велика

кількість публікацій щодо динаміки трактора, однак, як правило, при цьому розглядається рух трактора за стабільних параметрів стану.

Ефективність функціонування трактора визначається, в основному, забезпеченням стабільності його експлуатаційно-техноло-

гічних показників. У роботі [Артьомов та інш., 2016] з посиланням на інших авторів зазначається, що вирішення цієї проблеми ускладнюється при нестабільних параметрах трактора, обумовлених нестабільністю навантажувальних режимів, природно-виробничих факторів, технічного стану агрегатів і систем тощо.

Найбільш повно вивчені питання нестабільності динаміки трактора у роботах [Лебедев та ін., 2015; Хворост, 2021; Bulgakov, 2021], де оцінена нестабільність динамічних параметрів поступального руху тракторного агрегата за динамічною моделлю. Застосовуючи стандартну форму запису змінного стану трактора, розглянемо загальний випадок руху машинно-тракторного агрегата як автономної динамічної системи за зміни сил опору руху й кількості енергії, що використовується для руху. Цей вплив, як правило, викликає зміну швидкості $v(t)$ поступального руху тракторного агрегата, що характеризується рівнянням [Сенчук, 2010]

$$\frac{dv(t)}{dt} = \frac{P_{\kappa} - \sum R_c}{m_{az}}, \quad (1)$$

де P_{κ} – рухома сила агрегата (дотична сила тяги трактора), Н;

$\sum R_c$ – сума сил опору руху агрегата, Н;

m_{az} – приведена маса тракторного агрегата, кг.

Сили опору руху тракторного агрегата в ході роботи залежать від факторів, багато з яких є змінними, наприклад, стан ґрунту й рельєф місцевості, фізико-механічні властивості ґрунту, що обробляється, глибина обробки, швидкісний режим тощо. Відповідно до зміни сил опору змінюється і прискорення dv/dt за виконання тракторним агрегатом певного технологічного процесу.

Також слід зазначити, що найбільший вплив на опір руху агрегата має швидкість його руху та працездатність [Лебедев & Артьомов, 2013; Артьомов та інш., 2016]. У більшості відомих джерелах при дослі-

дженні динамічних складових сталого руху не враховуються додаткові стохастичні фактори, що виникають за змінної маси машин, що агрегуються.

Для оцінювання ефективності функціонування тракторного агрегата ефективно використовується метод змінних станів [Штіфзон та інш., 2020]. У цих роботах станом системи у момент часу t_o прийнято такий мінімальний набір відомостей щодо поведінки системи, інформації якого разом із деякою вхідною функцією $U(t)$, заданою для інтервалу часу $t_o \leq t \leq t_{\kappa}$, достатньо для однозначного визначення єдиної вихідної функції $y(t) \leq t \leq t_{\kappa}$, $t_{\kappa} \geq t_o$. За функцією $y(t)$ можна визначити змінний стан трактора.

Постановка завдань. Мета дослідження – підвищення безпеки використання тракторів шляхом покращення їхньої керованості за рахунок обґрунтування методології оцінки керованості трактора у просторі станів. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розробити нову методологію оцінки керованості трактора за змінних параметрів стану;

- обґрунтувати математичну модель стану трактора у ході керування за сукупністю нестабільних параметрів;

- виконати математичний опис нестационарних систем керування трактора в просторі станів.

Методи і матеріали. Методом дослідження обрано метод парціальних прискорень, що базується на методі парціальних прискорень СОУ-П, 2015, в основу якого покладена залежність (1) цієї статті.

Метод парціальних прискорень на практиці реалізується шляхом вимірювання прискорень трактора (подовжнього, поперечного й вертикального), що виникають у ході його руху при виконанні технологічної операції та подальшої математичної обробки отриманих результатів за відповідними методиками. Вимірювання здійснюються мобільним реєстраційно-вимірювальним комплексом, що складається з двох акселерометрів та обчислювального комплексу [Спосіб ..., 2019].

Методика дослідження базується на

адаптивній динамічній стабілізації забезпечення стійкості та керованості трактора у процесі руху з використанням вимірювально-реєстраційного комплексу для контролю прискорень тракторного агрегата, розробленого за участі авторів цієї статті. Для формування наукової проблеми, визначення мети і постановки завдань дослідження використано аналітичний метод і порівняльний аналіз тракторних агрегатів. У ході створення емпіричних моделей використано основні положення теорії стійкості систем і методології системного аналізу.

Результати. Керованість трактора оцінюється за станом системи керування у момент часу t_0 за мінімальних відомостей щодо його поведінки, інформації якої разом із деякою вхідною функцією $U(t)$, заданою для інтервалу часу $t_0 \leq t \leq t_k$, достатньо для однозначного визначення єдиної вихідної функції $y(t)$. Для характеристики стану системи керування введена сукупність змінних $x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dots, x_n(t)$, знання початкових значень $x_1(0), x_2(0), x_3(0), \dots, x_n(0)$ і вхідної дії $U(t)$, що дає змогу однозначно визначити майбутній рух динамічної системи. Ці змінні $U(t)$ називаються змінними стану, до яких віднесені радіус повороту r_n й ширина поворотної смуги E_{min} .

Для машино-тракторного агрегата (МТА) з трактором, який має передні керовані колеса:

$$r_{yln} = \frac{L}{tg \psi_k}, \quad (2)$$

де L – поздовжня база трактора, м;

ψ_k – середній кут повороту керованих коліс.

Для МТА з трактором, який має шарнірну раму й однакову поздовжню базу L передньої і задньої ланки рами:

$$r_{yln} = \frac{L}{2 \cdot tg \frac{\psi_p}{2}}, \quad (3)$$

де L – поздовжня база задньої ланки рами трактора, м;

ψ_p – кут складання рами відносно осі ведучих коліс.

Ширина поворотної смуги E_{min} визначається за формулами:

– за безпетльового повороту

$$E_{min} = l + r_{yln} + d_k, \quad (4)$$

– за петльового повороту

$$E_{min} = l + (r_{yln} + d_k) \cdot 2, \quad (5)$$

де l – довжина виїзду агрегата в метрах, необхідна, щоб крайні задні робочі органи не відхилялися від початкового напрямку більше, ніж це допустимо, залежить від кінематичної довжини агрегату l_k ; для причіпних МТА приймається рівною $(0,1 \dots 0,5) \cdot l_k$;

$2d_k$ – кінематична ширина агрегата.

Мінімальний радіус повороту r_{min} , що є відстанню від центру повороту до осі колії переднього зовнішнього керованого колеса за максимального кута його повороту без врахування уводу шин визначається за залежностями

$$r_{min} = \frac{L}{\sin \Theta_{max}} = \frac{L}{tg \psi_k^{max}}, \quad (6)$$

де L – база трактора, м;

Θ_{max} – максимальний кут повороту зовнішнього колеса, рад;

ψ_k^{max} – максимальний середній кут повороту керованих коліс відносно осі ведучих коліс.

З урахуванням бічного уводу для трактора з передніми керованими колесами:

$$r_{min} = \frac{L}{tg(\psi_k^{max} - \delta_1) + tg \delta_2}; \quad (7)$$

для трактора з шарнірною рамою або з передніми і задніми керованими колесами:

$$r_{min} = \frac{\frac{l_1}{\cos \Theta_{max}} + l_2}{tg(\Theta_{max} - \delta_1) \pm tg \delta_2}, \quad (8)$$

де δ_1 і δ_2 – кути уводу відповідно передніх і задніх шин, рад;

l_1 і l_2 – відстань відповідно від передньої і задньої осі до шарніру, м;

$\Theta_{\max}$ – максимальний кут повороту зовнішнього колеса, рад.

Керованість прямолінійного руху МТА оцінюється за коефіцієнтом керованості

$$\varepsilon_{\text{кер}} = \frac{\dot{\bar{\omega}}_{\alpha}}{\dot{\bar{\omega}}_{\psi}}, \quad (9)$$

де $\dot{\bar{\omega}}_{\alpha}$ – середня швидкість зміни курсового кута α МТА;

$\dot{\bar{\omega}}_{\psi}$ – середня швидкість кута керованих коліс МТА.

Кутова швидкість повороту внутрішнього керованого колеса визначається за залежністю:

$$\dot{\bar{\omega}}_{\alpha} = \frac{\dot{\bar{\omega}}_{\text{рк}} \cdot \eta_{\text{рм}}}{i_{\text{рм}}}, \quad (10)$$

де $\dot{\bar{\omega}}_{\text{рк}}$ – кутова швидкість рульового колеса;

$\eta_{\text{рм}}$ – ККД рульового механізму;

$i_{\text{рм}}$ – передатне число рульового механізму.

Поворот трактора за рахунок впливу зовнішніх збурювальних факторів набуває нерівномірного обертального руху. Цей рух характеризується змінними значеннями як кутового прискорення $\dot{\omega}_{\alpha} \neq \text{const}$, так і кута повороту $\alpha = f(t)$. Тоді рівняння (10) набуде виду:

$$\omega_{\alpha} = \dot{\alpha} = \frac{[\omega_0 \pm \dot{\omega}_{\text{рк}} \cdot t] \cdot \eta_{\text{рм}}}{i_{\text{рм}}}. \quad (11)$$

У будь-який момент часу t стан системи керування, що має m входів і r виходів (багатовимірна система), що характеризується змінними стану $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$, ..., $x_n(t)$ (рис. 1), є функцією початкового стану $x_1(0)$, $x_2(0)$, $x_3(0)$, ..., $x_n(0)$ та входних дій $U_1(t)$, $U_2(t)$, ..., $U_m(t)$;

$$x_i(t) = \psi_i[x_1(0), x_2(0), \dots, x_n(0);$$

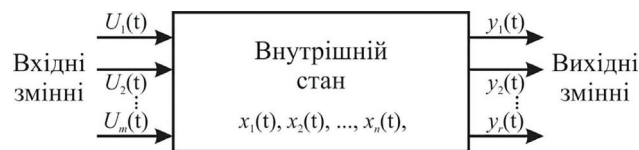


Рисунок 1 – Подання багатовимірної системи керування трактора у змінних станах

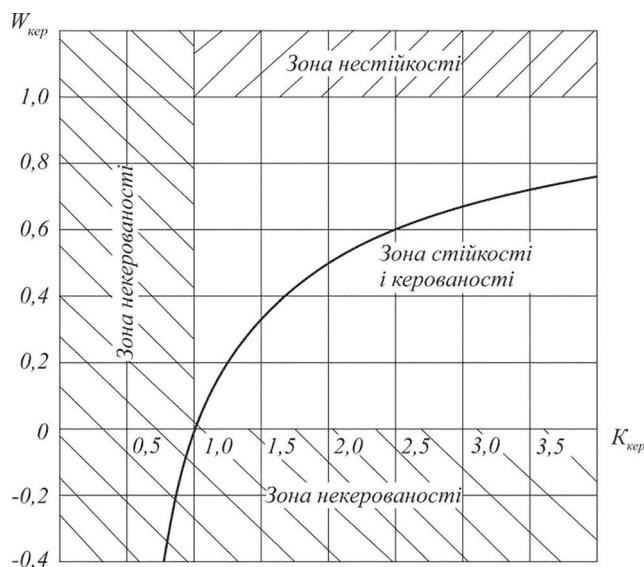


Рисунок 2 – Залежності передаточної функції керування тракторним агрегатом

$$U_1(t), U_2(t), \dots, U_m(t)].$$

Обґрунтовано залежність передаточної функції керування тракторним агрегатом (рис. 2), що дає змогу дати інтегральну оцінку її реакції на керувальні дії від значень параметричних характеристик:

$$W_{\text{кер}} = 1 - \frac{1}{K_{\text{кер}}} \left(1 + \frac{v}{\sum P_C} \cdot \frac{dm}{dt} - K_{\text{зб}} \right), \quad (12)$$

де m – маса тракторного агрегата в конкретний момент часу, кг;

v – швидкість руху тракторного агрегата в даний момент часу, м/с;

dm/dt – швидкість зміни маси тракторного агрегата;

t – час, с;

$\sum P_C$ – сума сил опору;

$K_{\text{кер}}$ – коефіцієнт керованості;

$$K_{\text{зб}} = P_{\text{зб}} / \sum P_C = -\dot{v}_{\text{зб}} / \dot{v}_c;$$

$P_{зб}$ – зовнішня збурювальна сила;

$\dot{v}_{зб}$, $\dot{v}_c$ – парціальне прискорення від дії зовнішніх збурювальних сил і сил опору, відповідно;

$$\dot{v}_c^n = \sum P_c / m.$$

Для сталого руху тракторного агрегата,

якщо $\frac{dm}{dt} = 0$ і $K_{зб} = 0$ рівняння (12)

спрощується і набуває виду:

$$W_{кер} = 1 - \frac{1}{K_{кер}}. \quad (13)$$

Зі збільшенням коефіцієнту керованості $K_{кер}$ відбувається збільшення $W_{кер}$, забезпечуючи тракторному агрегату ідеальну керованість, за якої

$$\frac{dv}{dt} = \dot{v}_{кер}^{парц}. \quad (14)$$

Аналізуючи залежність (12), можна зробити висновок про те, що зі збільшенням

$\sum P_c$ відбувається зменшення $K_{кер}$ і $W_{кер}$.

Умовою втрати стійкості руху тракторного агрегата є зростання передаточної функції до значення $W_{кер} > 1$, якщо:

$$K_{зб} > 1 + \frac{v}{\sum P_c} \cdot \frac{dm}{dt}. \quad (15)$$

Зона нестійкості руху тракторного агрегату буде за $W_{кер} > 1$, зона некерованості – $K_{кер} < 1$, або $W_{кер} < 0$.

Експериментальні дослідження з оцінювання керованості та стійкості руху проведені у Харківській філії УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого на ґрунтообробному агрегаті «ХТЗ-17221» + глибокорозпушувач «ГРУ-2,5» із застосування вимірювально-реєстраційного комплексу, розробленого за участі авторів цієї статті [Лебедев та ін., 2018].

Основою комплексу є ємнісні напівпровідникові трикоординатні давачі прискорень – акселерометри ММА7260QT з трьома робочими осями й межею вимірювання $\pm 1,5g$ (рис. 3).

На графіках прискорень на осі X відображено час t проведення експерименту, за який вимірювали прискорення трак-

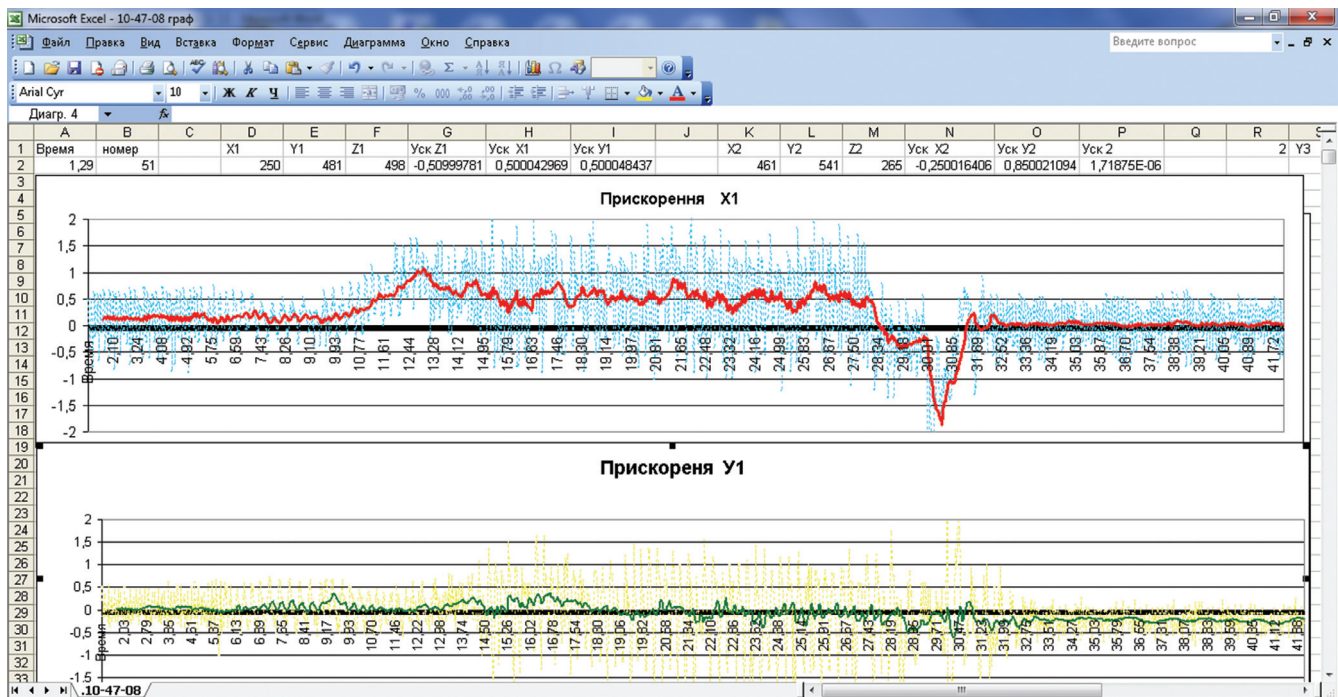


Рисунок 3 – Загальний вигляд графіків на моніторі вимірювально-реєстраційного комплексу:

$\dot{V}_x$ – поздовжніх, $\dot{V}_y$ – бокових прискорень

торного агрегату: по осі x — прямолінійне, y — бокове.

Обговорення. У ході оцінювання динаміки системи керування трактора ефективно використовувати метод змінних станів, відповідно до якого тракторний агрегат розглядається як багатовимірна динамічна система з керованими і некерованими вхідними змінними. Вихідні змінні, наприклад, для тракторного агрегата з передатною функцією $W(p)=K/(p^3+Ap^2+Bp+I)$ визначають параметри A і B , за яких реальна перехідна характеристика системи керування $y_n=y(t, \beta)$ буде ідентична $y_e=y(t, 0)$ з коефіцієнтом затухання $0,7 < \xi_e < 1,0$.

У відомій роботі [Лебедев, Артьомов, 2013] змінні параметри стану трактора визначаються його працездатністю, тобто його станом, за якого значення всіх його параметрів, що характеризують здатність виконувати задані функції, відповідають встановленим вимогам. Під час агрегування трактора із сільгоспзнаряддям стан тракторного агрегата найповніше може бути охарактеризовано трьома координатами: $v(t)$ — швидкістю руху; $y(t)$ — стійкістю напрямку руху і $z(t)$ — глибиною ходу робочого органу сільгоспзнаряддя, наприклад, плуга. Параметри $y(t)$ і $z(t)$ в загальному випадку визначають продуктивність тракторного агрегату $W(t)$, витрату палива $G(t)$ і якість технологічного процесу $\Phi(t)$. Зазвичай тракторний агрегат оптимізується за одним із показників $W(t)$, $G(t)$, ... $\Phi(t)$, наприклад за $W(t)$, за умови збереження в заданих межах інших показників $G(t)$, ..., $\Phi(t)$.

Система диференціальних рівнянь для аналізу динамічних характеристик тракторного агрегата як об'єкта керування з оцінкою стійкості прямолінійного руху з постійною швидкістю $v=\text{const}$ після лінеаризації має вид:

$$\left. \begin{aligned} (T_\varphi \rho + 1) \Delta \varphi &= K_{\varphi\Theta} \Delta \Theta + K_{\varphi\psi} P_{\Delta\psi} + f_\varphi; \\ (T_\Theta \rho + 1) P_{\Delta\Theta} &= -K_{\Theta\varphi} \Delta \varphi + K_{\Theta\psi} P_{\Delta\psi} - K_{\Theta e} \Delta \delta_e - K_{\Theta n} \Delta \delta_n + f_\Theta; \\ (T_\psi \rho + 1) P_{\Delta\psi} &= -K_{\psi\varphi} \Delta \varphi + K_{\psi\Theta} P_{\Delta\Theta} - K_{\psi e} \Delta \delta_e - K_{\psi n} \Delta \delta_n + f_\psi. \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

де T_φ , T_Θ , T_ψ — постійні часу трактора

за кутами ψ , Θ ;

$K_{\varphi\Theta}$, $K_{\varphi\psi}$, $K_{\Theta\varphi}$, $K_{\Theta e}$, $K_{\Theta n}$, $K_{\psi\varphi}$, $K_{\psi\Theta}$, $K_{\psi e}$, $K_{\psi n}$ — коефіцієнти підсилення;

f_φ , f_Θ , f_ψ — збурювальні дії.

За малої кривизни схилу $\Delta\Theta=0$ й відсутності при цьому керуючих дій на забезпечення напрямку лінії тяги за поздовжньою віссю трактора $\Delta\delta_e=0$ із системи рівнянь (16) отримаємо диференціальне рівняння руху трактора для оцінки стійкості руху за кутом ψ у вигляді:

$$\begin{aligned} (T_o^2 \rho + 2\xi_o T_o P_2 + 1) P_{\Delta\psi} &= \\ &= (T_\varphi \rho + 1) (-K_o \Delta\delta_n + f_\psi), \end{aligned} \quad (17)$$

$$\text{де } T_o = \sqrt{\frac{T_\psi T_\varphi}{1 + K_{\varphi\psi} K_{\psi\varphi}}};$$

$$\xi_o = \frac{T_\psi + T_\varphi}{\sqrt{T_\psi T_\varphi (1 + K_{\varphi\psi} K_{\psi\varphi})}};$$

$$K_o = \frac{K_{\psi n}}{1 + K_{\varphi\psi} K_{\psi\varphi}}.$$

Передавальна функція трактора як об'єкта керування при оцінці прямолінійності його руху згідно з рівнянням (17) запишемо так:

$$W_1(S) = \frac{K_o (T_\varphi S + 1)}{P(T_o^2 S^2 + 2T_o \xi_o S + 1)}. \quad (18)$$

Аналіз передавальної функції трактора (18) засвідчує, що за кутом відхилення від прямолінійного напрямку руху трактора можна представити поєднання аперіодичної й інерційної ланок. За цією залежністю оцінюється нестабільність динаміки трактора за змінних станів.

Вирішення проблеми стабільності динаміки керованості трактора за змінних станів досягається при його напівавтоматичному керуванні за участі водія. В аграрному секторі України ефективними є трактори закордонного виробництва з системами ручного та автоматичного керуван-

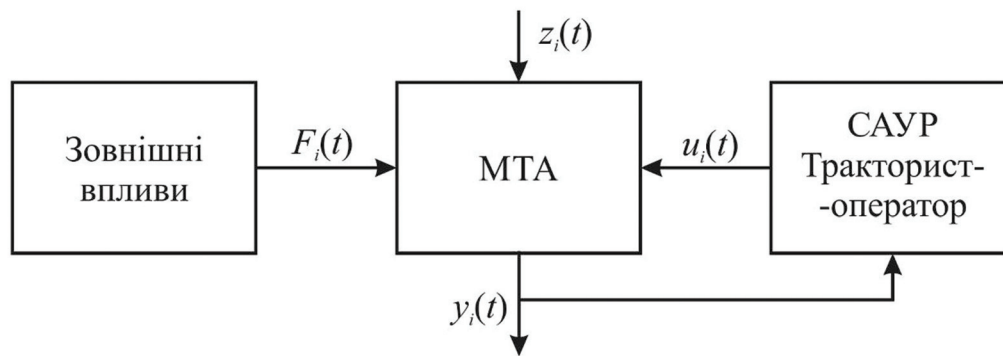


Рисунок 4 – Напівавтоматична система керування роботою машинно-тракторного агрегата:

САУР – система автоматичного управління режимами роботи; $F_i(t)$ – зовнішні впливи; $y_i(t)$ – вихідні сигнали вимірювальних приладів; $u_i(t)$ – впливи на органи управління МТА; $z_i(t)$ – параметри безпечного руху МТА

ня напрямком руху. Наприклад, трактори марки «John Deere» серії 8R обладнані приводом керування передніми колесами в автоматичному та ручному режимах. Механічний привід передніх коліс трактора автоматично вмикається, якщо швидкість трактора є нижчою за 19 км/год., кут повороту менше за вибране значення, або якщо натиснути обидві педалі гальма.

Ця система є типовою системою напівавтоматичного керування тракторним агрегатом (рис. 4).

Керування трактором за цією схемою є можливим при ручному й автоматичному режимах. При ручному керуванні тракторист візуально і на слух сприймає вихідні сигнали $y_i(t)$, здійснює зворотній зв'язок, впливаючи на органи керування $u_i(t)$. Водночас він безперервно контролює хід технологічного процесу, що виконується, забезпечуючи безпеку руху і якість технологічного процесу. При автоматичному керуванні МТА зворотній зв'язок здійснює САУР, яка приймає вхідні сигнали $y_i(t)$, обробляє їх за певним алгоритмом, подає сигнал $u_i(t)$ механізмам управління МТА. При автоматичному управлінні МТА тракторист-оператор виконує обмежену кількість функцій управління: запуск трактора, контроль за роботою САУР, водіння і зупинка агрегата, втручання у роботу САУР в екстремальних умовах.

Робота тракториста-оператора за авто-

матичного керування МТА не полегшується, оскільки йому необхідно слідкувати як за технологічним процесом, що виконується, так і за екраном дисплея.

Напівавтоматичне керування МТА не отримало належного висвітлення в технічній літературі, що можна пояснити, в основному, недостатністю досліджень дій водія за напівавтоматичного керування МТА. У Харківській філії УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого проведені дослідження з оцінювання динаміки МТА у складі трактора «John Deere 8430» та дискової борони «John Deere 637» за напівавтоматичного керування.

За результатами випробувань МТА доведено задовільний збіг параметрів динаміки МТА при напівавтоматичному керуванні, що забезпечується лише тоді, коли смуга пропускання інформації щодо необхідності коригування напрямку руху МТА не перевищує $\omega = 5,0 \text{ с}^{-1}$. За відсутності коригувань водія на МТА за динамічними параметрами найбільш придатним є об'єкт, що описується аперіодичною ланкою. Час перехідного процесу такого МТА не повинен перевищувати 1,0 с.

За напівавтоматичного керування МТА з тривалим коригуванням системи автоводіння умова стійкості роботи агрегата зберігається у всьому діапазоні зміни його динамічних параметрів. За короткочасного однократного та багаторазового коригу-

вання системи автоводіння стійкість руху агрегата зберігається при відношенні динамічних параметрів, що характеризують його інерційність за швидкістю (T_i) і за прискоренням (T_o) у межах $0,38 < T_i/2T_o < 0,71$.

Основи динамічної адаптації в теорії управління і автоматизованих систем розвинені в роботах [Donnell Hunt, 2001; Штіфзон та ін., 2020], які ефективні для тракторних агрегатів [Сенчук, 2010; Лебедев та ін., 2015]. Однак отримані результати застосовані за ручного керування трактором і не дають змоги оцінити напівавтоматичне керування за участю водія. Дослідження у цьому напрямку ефективні для тракторів закордонного виробництва, що застосовуються в аграрному секторі України.

Висновки. У ході оцінювання динамічної адаптації системи керування трактора ефективно використовувати метод змінних станів, відповідно до якого тракторний агрегат розглядається як багатомірна динамічна система з керованими і некерованими вхідними змінними. Теоретично обґрунтована й експериментально підтверджена зона стійкості і керованості тракторного агрегату від збурювальних сил і сил опору. Доведено ефективність експериментального дослідження з оцінювання керованості та стійкості руху ґрунтообробного агрегату із застосуванням вимірювально-реєстраційного комплексу, розробленого за участі авторів цієї статті.

Напівавтоматичне керування тракторним агрегатом не отримало належного висвітлення в технічній літературі, що можна пояснити, в основному, можливістю дій водія тільки на тракторах закордонного виробництва.

Перелік літератури

Артьомов М. П., Подригало М. А., & Шуляк М. Л. (2016). Визначення динамічних характеристик сільськогосподарських агрегатів. Вібрації в техніці та технологіях. 3 (83). 5-10.

Лебедев А.Т., & Артьомов М.П. (2013)

Динамічний метод оцінки працездатності тракторного агрегату. Механізація сільськогосподарського виробництва. Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Харків. Вип. 135. С. 129-140.

Лебедев А.Т., Артьомов М.П., Шуляк М.Л., & Лебедева І.А. (2015) Забезпечення стійкості і керованості сільськогосподарських агрегатів із змінною масою. Збірник наук. праць ВНАУ. Вінниця: ВНАУ. Вип. 1 (89), т. 1. С. 57-62.

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

Сенчук М.М. (2010). Механізація і автоматизація сільськогосподарського виробництва: Навчально-методичний посібник для самостійної роботи та лабораторно-практичних занять за кредитно-модульною системою організації навчального процесу для студентів економічного факультету. Біла Церква, 2010. 206 с.

СОУ-П УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого 71.2-37-046043090-017:2015. Сільськогосподарська техніка. Визначення тягових показників тракторів. Метод парціальних прискорень. Дослідницьке : УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, 2015. III, 9 с. (Стандарт організації України).

Спосіб вимірювання параметрів руху рухомих об'єктів: пат. на винахід 119037 Україна: МПК G01P 3/00, G01P 15/00, G01P 15/14 (3013.01), G01P 15/18 (2013.01), G01P 3/50 (2006.01). № а 2015 10855 ; заявл. 06.11.2015 ; опубл. 25.04.2019, Бюл. № 8.

Хворост О. Г. (2021). Оцінка динамічної навантаженості гусеничних машин і шляхи підвищення їх надійності: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.20 Експлуатація та ремонт засобів транспорту ; Харків, 22 с.

Штіфзон О.Й., Новіков П.В., Бунь В.П. (2020). Теорія автоматичного управління: Навчальний посібник [Електронний ресурс]. Електронні текстові дані (1 файл: 2,2 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 144 с.

Bulgakov V. (2021). Improving the performance of a ploughing tractor by means of an auxiliary carriage with motorized axle. *Journal of Agricultural Engineering*, 52(1). doi: 10.4081/jae.2021.1109.

Hunt D. (2001) *Farm Power and Machinery Management*, Wiley-Blackwell. 368 p.

OECD (2012). *Standard Code For The Official Testing Of Agricultural And Forestry Tractor Performance*. Code 2. 107 c.

References

Artyomov M. P., Podrygalo M. A., & Shulyak M. L. (2016). Determination of dynamic characteristics of agricultural units. *Vibrations in engineering and technologies*. 3 (83). 5–10.

Bulgakov V. (2021). Improving the performance of a ploughing tractor by means of an auxiliary carriage with motorized axle. *Journal of Agricultural Engineering*, 52(1). doi: 10.4081/jae.2021.1109.

Hunt D. (2001) *Farm Power and Machinery Management*, Wiley-Blackwell. 368 p.

Khvorost O. G. (2021). Assessment of dynamic loading of tracked vehicles and ways to increase their reliability: author's abstract of the dissertation ... candidate of technical sciences. sciences: 05.22.20 Operation and repair of vehicles; Kharkiv, 22 p.

Lebedev A. T., & Artyomov M. P. (2013) Dynamic method for assessing the performance of a tractor unit. *Mechanization of agricultural production. Bulletin of the P. Vasylenko KhNTUSG*. Kharkiv. Issue 135. P. 129-140.

Lebedev A. T., Artyomov M. P., Shulyak M. L., & Lebedeva I. A. (2015) Ensuring stability and controllability of agricultural units with variable mass. *Collection of scientific works of VNAU*. Vinnytsia: VNAU. Issue 1 (89), vol. 1. pp. 57-62.

Lebedev A. T., Lebedev S. A., & Korobko A. I. (2018). *Qualimetry and metrological support for tractor tests*. Kharkiv: Publishing house «Miskdruk». 394 p.

Method of measuring the parameters of the motion of moving objects: patent for invention 119037 Ukraine: MPK G01P 3/00, G01P 15/00, G01P 15/14 (3013.01), G01P 15/18 (2013.01), G01P 3/50 (2006.01). No. a 2015 10855 ; appl. 06.11.2015 ; publ. 25.04.2019, Bull. No. 8.

OECD (2012). *Standard Code For The Official Testing Of Agricultural And Forestry Tractor Performance*. Code 2. 107 c.

Senchuk M.M. (2010). *Mechanization and automation of agricultural production: Educational and methodological manual for independent work and laboratory and practical classes according to the credit-modular system of organizing the educational process for students of the Faculty of Economics*. Bila Tserkva, 2010. 206 p.

Shtifzon O.Y., Novikov P.V., Bun V.P. (2020). *Theory of automatic control: Textbook [Electronic resource]*. Electronic text data (1 file: 2.2 MB). Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2020. 144 p.

SOU-P L. Pogorilyy UkrNDIPVT 71.2-37-046043090-017:2015. *Agricultural machinery. Determination of traction indicators of tractors. Method of partial accelerations*. Doslidnytske: L. Pogorilyy UkrNDIPVT, 2015. III, 9 p. (Standard of the organization of Ukraine).

UDC 631.37

DYNAMIC ADAPTATION OF TRACTOR CONTROL SYSTEMS IN CHANGING CONDITIONS

Lebedev A., Doctor of Engineering Sciences, 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, <https://orcid.org/0000-0002-3067-5135>

L. Pogorilyy UkrNDIPVT Kharkiv branch

Rosul R., associate professor, Ph. D.,
<https://orcid.org/0009-0008-6855-4612>
Mukachevo State University

Summary

Research object - increasing the safety of tractor use by improving their controllability by substantiating the methodology for assessing tractor controllability in the state space.

Research methods. The research methodology is the method of partial accelerations, which is based on the dependence of the tractor's acceleration on the traction load. The research methodology is based on the adaptive dynamic stabilization of ensuring the stability and controllability of the tractor during movement using a measuring and recording complex for monitoring the accelerations of the tractor unit, developed with the participation of the authors of this article.

Results. The possibility of assessing the state of the tractor control system with minimal information about its behavior and the validity of the stability and controllability zone of the tractor unit has been proven. When assessing the dynamics of the tractor control system, it is effective to use the method of alternating states, according to which the tractor unit is considered as a multidimensional dynamic system. With semi-automatic control of foreign tractors with long-term adjustment of the control system, the condition of stability of the tractor unit operation is maintained throughout the entire range of changes in its dynamic parameters.

Conclusion. When assessing the dynamic adaptation of the tractor control system, it is effective to use the method of alternating states, according to which the tractor unit is considered as a multidimensional dynamic system with controlled and uncontrolled input variables; the zone of stability and controllability of the tractor unit from disturbing forces and resistance forces is theoretically substantiated and experimentally confirmed. The effectiveness of the experimental study on assessing the controllability and stability of the movement of the tillage unit using the measuring and recording complex developed with the participation of the authors of this article is proven. Semi-automatic control of the tractor unit has not received proper coverage in the technical literature, which can be explained mainly by the possibility of driver actions only on foreign-made tractors.

Keywords: tractor, alternating states, control system, dynamic adaptation, partial acceleration.