

М. Л. ШУЛЯК, А. Т. ЛЕБЕДЕВ, Г. І. БРАБАШ, М. С. ШЕЛЕСТ

ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО АГРЕГАТУ У ДИНАМІЧНОМУ ПРОСТОРІ

У статті розглянуто методику аналізу функціонування транспортно-технологічного агрегату в динамічному просторі. Оскільки, процес руху тракторного агрегату містить багато стохастичних факторів і його математичне моделювання ускладнюється невизначеністю умов, то класичні підходи до аналізу динамічних складових такого руху не ефективні. Запропоновано аналізувати найбільш інформативні – визначальні параметри функціонування, які можуть бути отримані експериментальним шляхом. Також зазначено, що бортові системи трактора мають можливість моніторингу відповідних параметрів, тому для сучасного трактора можлива інтеграція методики аналізу у вигляді алгоритму управління роботою транспортно-технологічного агрегату.

Ключові слова: транспортно-технологічний агрегат, функціонування, динамічний простір, функціональна схема.

M. SHULIAK, A. LEBEDEV, H. BARABASH, M. SHELEST

RESEARCH ON THE FUNCTIONING OF A TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL UNIT IN DYNAMIC SPACE

The article considers the methodology for analyzing the functioning of a transport and technological unit in dynamic space. Since the process of tractor unit motion contains many stochastic factors and its mathematical modeling is complicated by the uncertainty of conditions, classical approaches to the analysis of the dynamic components of such motion are not effective. It is proposed to analyze the most informative - determining parameters of functioning, which can be obtained experimentally. It is also noted that the on-board systems of the tractor have the ability to monitor the relevant parameters, therefore, for a modern tractor, integration of the analysis methodology in the form of an algorithm for controlling the operation of the transport and technological unit is possible.

Keywords: transport and technological unit, functioning, dynamic space, functional scheme.

Вступ. Тенденція останніх років показує, що формування тракторних агрегатів відбувається на базі тракторів тягово-енергетичної концепції. Тобто, можливості по повній реалізації потужності їх двигунів передбачають одночасне використання трактора, як в режимі тягача, так і в режимі енергетичної установки. Проте на транспортних та транспортно-технологічних операціях рослинництва реалізувати повну потужність двигуна дуже важко, особливо, коли маса вантажу змінюється в процесі роботи. Тому виникає питання функціональної стабільності тракторних агрегатів при наявності внутрішніх і зовнішніх збурюючих чинників та змінної маси вантажу технологічної машини.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Процес руху тракторного агрегату містить багато стохастичних факторів і його математичне моделювання ускладнюється невизначеністю умов. Особливо важко моделювати подібний рух при постійній зміні маси вантажу, яка виникає внаслідок виконання технологічної операції [1-4]. Для транспортно-технологічних агрегатів виконання технологічної операції пов'язано з більш складними динамічними процесами, оскільки потужність двигуна витрачається на транспортну і технологічну частини. Причому, обидві частини матимуть як статичну, так і динамічну складову [2]. Оскільки моделювання руху на підставі математичного опису достатньо складне, то для спрощення можна використовувати експериментальні данні або данні з бортових систем трактора. У результаті можна звести наліз роботи агрегату до кількох визначальних параметрів функціонування і за їх змінами робити висновок щодо ефективності роботи [3]. Представити функціонування агрегату при наявності внутрішніх і зовнішніх збурюючих чинників можна з використанням методології функціонального моделювання IDEF0. Реалізація подібного підходу для оцінки працездатності трактора за нестабільних параметрів стану представлена в роботі [5] при формуванні функціональної схеми трактора. За допомогою математичного

апарату представлено в роботах [6, 7] можна провести аналіз впливу збурюючих чинників та ступеня адаптації до них тракторного агрегату. Як один з визначальних параметрів функціонування в цих роботах пропонується прийняти прискорення агрегату, оскільки маючи його значення можна встановити значення сил, що діють на агрегат та їх динамічні складові. Підхід до практичної реалізації методу парціальних прискорень при аналізі динаміки функціонування тракторних агрегатів, представлений в роботах [7, 8]. Функціонування тракторного агрегату можна представити, як динамічний простір де область функціонування біде визначена зміною визначальних параметрів, а досягнення одного або кількох параметрів своїх граничних значень буде характеризувати працездатність агрегату [5].

Мета та постановка задачі. Вирішення оговорених проблем передбачає обґрунтування методики побудови динамічного простору функціонування транспортно-технологічного агрегату в умовах зовнішніх змінних.

Результати досліджень. При дослідженні динаміки транспортно-технологічного агрегату, доцільно, його розглядати як систему, що виконує роботу в умовах зовнішніх змінних, зумовлених різними факторами.

Факторами впливу можуть бути: частота наїзду на перешкоди при русі по нерівностям; фізико-механічні властивості ґрунту; мікро- і макропрофілі опорної поверхні тощо. При цьому стабільність функціонування агрегату буде характеризуватися здатністю системи компенсувати зовнішні збурюючі чинники за рахунок управляючих впливів.

Умови роботи, у тому числі їх динамічні впливи, приймають як вхідні змінні, управляючі впливи, які визначаються величинами сили, моментів сил, переміщенням – дії з боку оператора або автоматичної системи управління. У результаті взаємодії вхідних змінних та управляючих впливів отримаємо вихідні параметри, які є сукупністю параметрів, що характеризують функціональні показники транспортно-технологічного агрегату. У загальному вигляді транспортно-технологічний агрегат можна представити у вигляді системи, для якої вхідними параметрами будуть вектори-функції збурюючих $F(t)$ і управляючих $U(t)$ впливів. Вихідні функціональні параметри, які характеризують роботу транспортно-технологічного агрегату, представлені вектором-функцією $Y(t)$. Динамічні властивості агрегату визначаються функціональною залежністю $W_T = S_y / S_u$, де S_y і S_u вихідні та вхідні параметри, відповідно рис. 1.

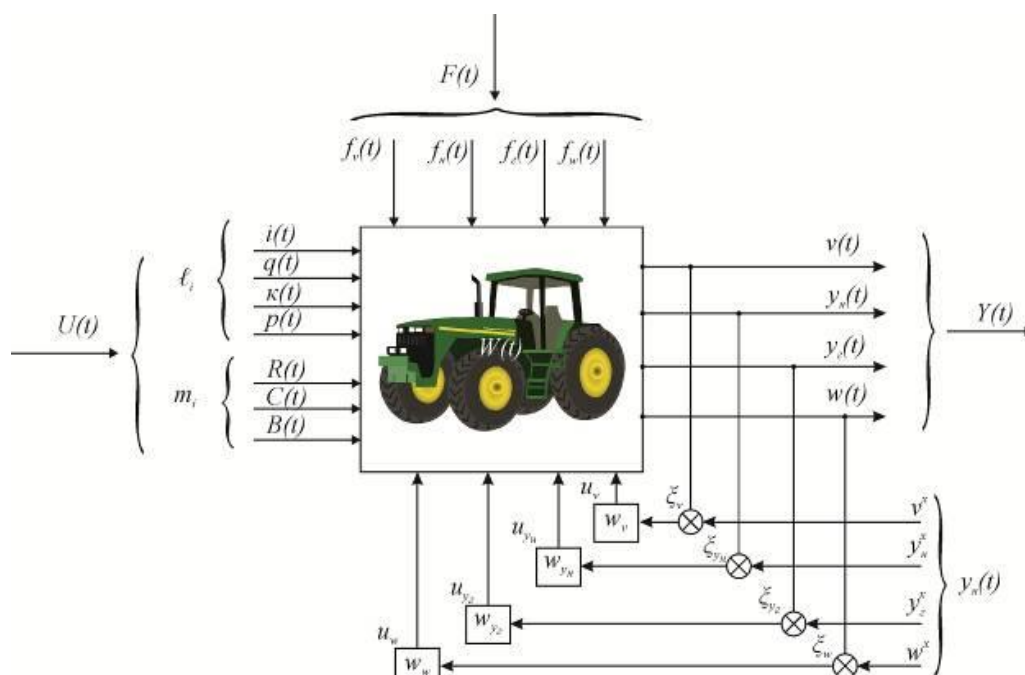


Рис. 1 – Узагальнена функціональна схема

Вектори-функції управління, що впливають на транспортно-технологічний агрегат доцільно поділити на керовані l_i : подача палива $q(t)$; передаточне число трансмісії $i(t)$; кут повороту рульового управління $k(t)$; зусилля на гальма $p(t)$, та некеровані m_i : тяговий опір $R(t)$, мікро- та макропрофіль дороги $C(t)$, вплив повітря тощо $B(t)$. Під впливом збурюючої $F(t)$ і управляючих $U(t)$ впливів формуються вихідні змінні $Y(t)$. Їх можна охарактеризувати швидкістю $v(t)$ та стійкістю $y_n(t)$ руху, ефективністю гальмування $y_z(t)$ та динамічними властивостями агрегату $w(t)$.

Нестабільність функціональних параметрів $v(t)$, $y_n(t)$, $y_z(t)$ і $w(t)$ визначається збурюючими впливами $F(t)$. При порівнянні поточних значень параметрів v^x , y_n^x , y_z^x і w^x , з відповідними значеннями, які характеризують стабільність роботи агрегату, на ланках ξ_v , ξ_n , ξ_z і ξ_w з передаточними функціями W_v , W_{y_n} , W_{y_z} і W_w забезпечується корегування керованих вхідних змінних u'_v , u'_{y_n} , u'_{y_z} і u'_w .

Дійсна швидкість руху $v(t)$ визначається вхідними функціями подачі палива $q(t)$ та передаточним числом трансмісії $i(t)$. Вона формує експлуатаційні властивості транспортно-технологічного агрегату. Стійкість $y_n(t)$ руху та ефективність гальмування $y_z(t)$, які спрямовані на забезпечення безпеки руху транспортно-технологічного агрегату, визначаються в основному $v(t)$ та зовнішніми збурюючими чинниками $f_n(t)$ – збуреннями напрямку руху, $f_z(t)$ – збуреннями гальмування.

Аналізу функціональних параметрів $v(t)$, $y_n(t)$, $y_z(t)$ і $w(t)$ транспортних засобів на базі колісних тракторів присвячено значну кількість робіт [9], в яких запропоновані методи і засоби забезпечення їх функціонування. Динамічний параметр $w(t)$ характеризує рух транспортно-технологічного агрегату.

При вирішенні завдань управління транспортних агрегатів у динамічному просторі функціонування, їх можна розглядати, як детерміновані (регулярні, не випадкові) керовані системи, описані векторним диференціальним рівнянням в формі Коші:

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (1)$$

де $x \in R^n$, $x \in R^2$ – векторні аргументи відповідно елементів їх управління; t – скалярний аргумент часу.

В даному рівнянні векторна функція f векторних аргументів x, u і скалярного аргументу t вважається заданою і належить деякому класу функцій, що допускає існування рішень рівняння (1) при заданих $x(t)$, $u(t)$ або $u(x, t)$ у всьому динамічному просторі функціонування, або в його областях, що охоплюють частину даного простору. При розгляді області функціонування у взаємозв'язку функціональних параметрів $v(t)$, $y_n(t)$, $y_z(t)$ і $w(t)$ (за рис. 1) розглянута область простору функціонування поділяється на підобласті, для кожної, з яких задається своя безперервна функція f , що задовольняє вказаним умовам в області визначення. Поведінка системи на границях підобластей довізначається, тобто визначається додатковими умовами (наприклад, умовами безперервності).

При описі транспортного агрегату в просторі функціонування, наприклад, по поздовжній координаті руху, його можна розглядати як детерміновану лінійну безперервно керовану систему, описану рівнянням:

$$\dot{x} = A(t)x + B(t)u \quad (2)$$

або

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3)$$

де $x \in R^n$, $x \in R^2$; A – матриця коефіцієнтів (в загальному випадку функцій часу) розміру $n \times n$; B – матриця коефіцієнтів (також в нестандартному випадку функцій часу) розміру $n \times 2$.

Якщо A і B є матричними функціями часу (як в (2, 3)), то лінійна система називається нестационарною.

Якщо $A = \text{const}$, $B = \text{const}$, то лінійна система стаціонарна.

Загальний розв'язок рівняння (2) може бути записано у вигляді:

$$x(t) = K(t, t_0)x(t_0) + \int_{t_0}^t K(t, \theta)B(\theta)u(\theta) d\theta \quad (4)$$

де $K(t, t_0)$ – матриця Коші системи (2) задовольняє матричному рівнянню і початковій умові:

$$\frac{d}{dt}K(t, t') = A(t)K(t, t'); \quad K(t', t') = E,$$

де E – одинична матриця.

При коригуванні параметрів стійкості напрямку руху $y_n(t)$ і гальмування $y_z(t)$ (за рис. 1) його необхідно розглядати (в динамічному просторі функціонування) як детерміновану лінійну керовану систему з дискретним часом.

Дана система описується наступним лінійним рівнянням:

$$x[k+1] = A[k]x[k] + B[k]u[k] \quad (5)$$

Лінійна безперервна система виду (2) відноситься до того класу систем, для яких відомий спільний розв'язок:

$$x(t) = K(t, t_0)x(t_0) + \int_{t_0}^t K(t, \tau)B(\tau)u(\tau)d\tau \quad (6)$$

де $K(t, t_0)$ – матриця Коші (фундаментальна матриця) безперервної системи, яка задовольняє рівнянню:

$$\frac{d}{dt}K(t, t') = A(t)K(t, t') \quad (7)$$

за умови $K(t, t_0) = E$, де E – одинична матриця.

При сталості управління $u(t) + u(k)$ на кожному інтервалі від t_k до t_{k+1} і ступеневій його зміні, наприклад, при коригуванні напрямку руху транспортного агрегату, в зазначені моменти часу з (6) впливає (5), де

$$A[k] = K(t_{k+1}, t_k), \quad B[k] = \int_{t_k}^{t_{k+1}} K(t_{k+1}, \tau)B(\tau)d\tau \quad (8)$$

Позначення $B[k]$ і $B[\tau]$ тут відповідають різним функціям.

Матриця Коші дискретної в часі системи (5) $K[k, j]$ однозначно визначається рівнянням:

$$K[k+1, j] = A[k]K[k, j], \quad k > j \quad (9)$$

і умовою $K[k, j] = E$.

З рівняння (9) з врахуванням умови випливає, що при $k > j$:

$$K[k, j] = A[k-1]A[k-2]...A[j] \quad (10)$$

Розв'язок лінійного рівняння (5) має вигляд:

$$x[k] = K[k, j]x[j] + \sum_{v=j}^{k-1} K[k, v+1]B[v]u[v], \quad k > j. \quad (11)$$

При випадкових збурюючих впливах на транспортний агрегат $f_v(t)$, $f_n(t)$ і $f_c(t)$, обумовлених в основному некерованими вхідними змінними m_i (за рис. 1), агрегат можна розглядати як стохастичну лінійну керовану систему з дискретним часом. Ця система відрізняється від системи (5) тільки наявністю адитивного випадкового числа $w[k]$:

$$x[k+1] = A[k]x[k] + B[k]u[k] + w[k] \quad (12)$$

Випадкова послідовність $w[k] = 1, 2, \dots$, може бути Гаусовою. Тоді $E[w[k]] = 0$, $E[w]w^T[x-i] = 0$, $i = 1, 2, \dots$. Процес $x[k]$ (12) при заданому u в цьому випадку є марковським, дискретним у часі, процесом.

При графічному аналізі простору функціонування транспортного агрегату даний простір розглядається як евклідов простір станів IR^n безперервної кінцевомірної системи. Безперервність подібних систем в даному випадку розуміється в сенсі відсутності квантування за рівнем і часом, тобто в сенсі безперервності множини можливих станів. Елементами простору станів IR^n служать вектори:

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n], \quad x^T = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T, \quad (13)$$

де $x_1, x_2, \dots, x_n$ – матриця-рядок; «Т» – символ транспонування.

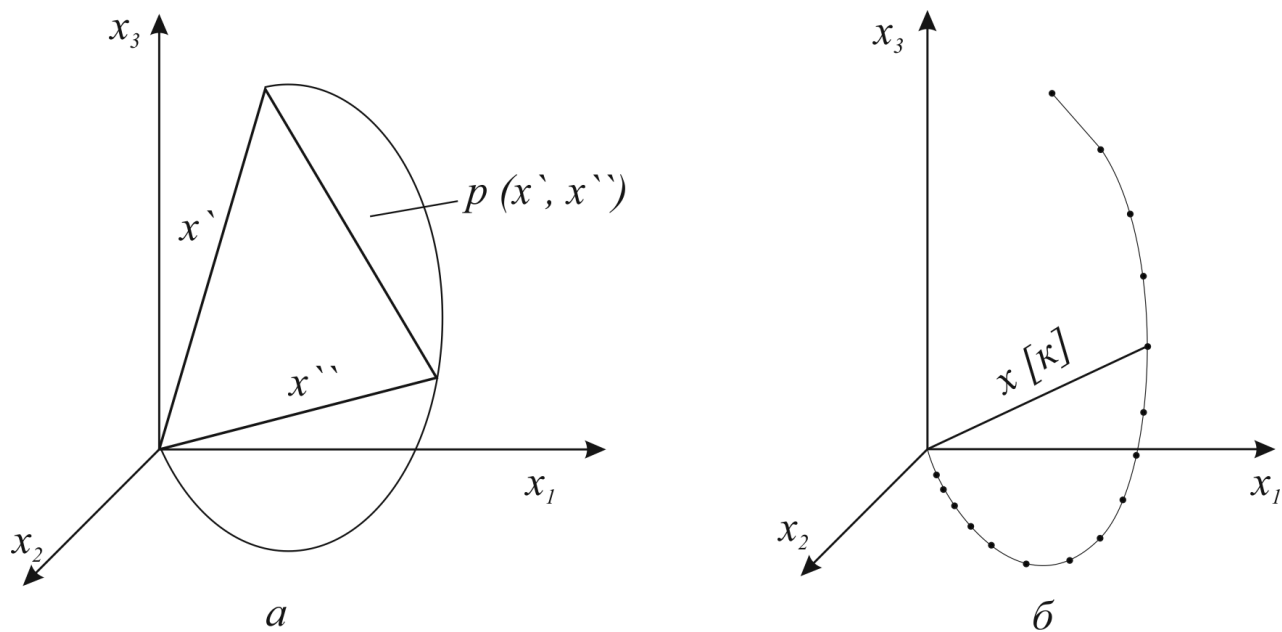
Відстань p , як евклідова норма різниці векторів $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$ і $x'' = (x''_1, x''_2, \dots, x''_n)$, визначається за залежністю:

$$p(x', x'') = \left[(x'_1 - x''_1)^2 + (x'_2 - x''_2)^2 + \dots + (x'_n - x''_n)^2 \right]^{1/2} = \left[(x' - x'')^T (x' - x'') \right]^{1/2} \quad (14)$$

Ця відстань задовольняє трьома аксіомам метричного простору, в якому задано відстань між кожними двома елементами $x \in X$, $y \in X$ у вигляді дійсної функції $p(x, y)$:

1. $p(x, y) = 0$ тоді і тільки тоді, коли $x = y$,
2. $p(x, y) = p(y, x)$ – аксіома симетрії,
3. $p(x, z) \leq p(x, y) + p(y, z)$ – аксіома трикутника.

Абстрактний евклідовий простір найбільш природний в тому сенсі, що при $n=3$, наприклад, при побудові динамічного функціонального простору транспортного агрегату за трьома координатами руху, він аналогічний реальному тривимірному простору (в евклідовому наближенні). Ілюстрація цього простору станів і траєкторія руху в ньому (фазова крива) наведені на рис. 2 (а).

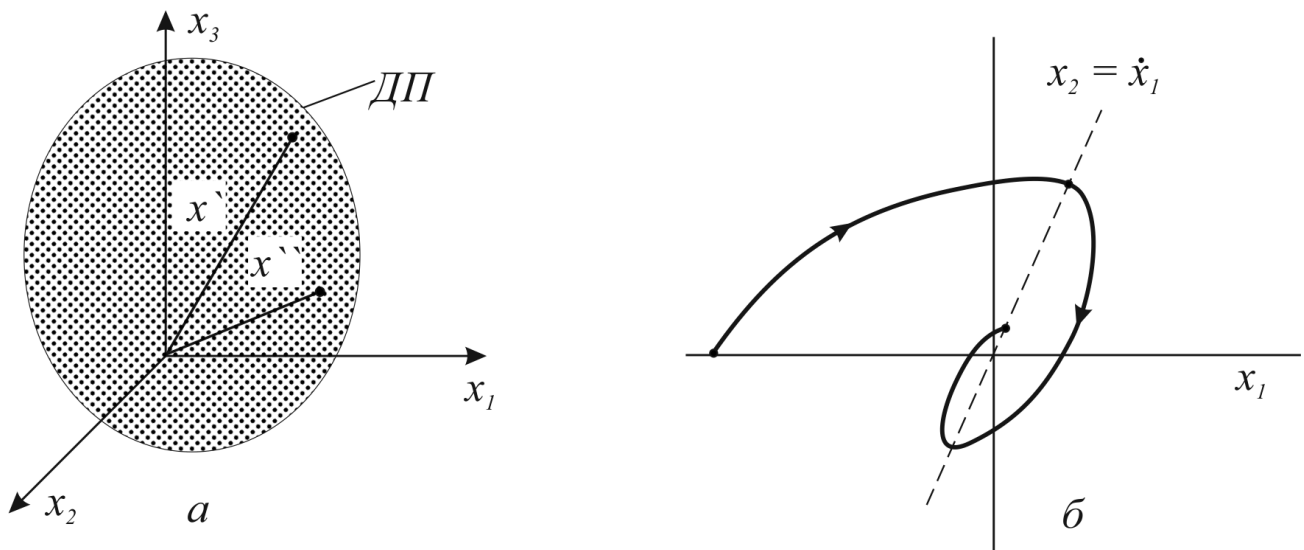


а – кінцевомірна система (безперервна); б – кінцевомірна система з дискретним часом
Рис. 2 – Динамічний простір функціонування транспортно-технологічного агрегату

Тут $x' = x(t_1)$, $x'' = x(t_2)$, $t_1 < t_2$. Фазова траєкторія є годографом вектора $x(t)$ при зміні часу t . Кінець вектора $x(t)$ зображується точкою, що має однакові координати з вектором (13). Функціональний простір транспортного агрегату при періодичному коригуванні напрямку руху $y_n(t)$, а також впливу на гальмівну систему $y_z(t)$, може бути віднесений до евклідового простору станів кінцевомірної системи з дискретним часом (рис. 2, б). Даний простір не відрізняється від попереднього. Однак переміщення відображеної точки відбувається стрибками і вектор стану $x[k] = x(t_k)$ визначено лише в дискретні моменти часу $t_0, t_1, \dots, t_{k-1}, t_k$. При визначенні динамічного простору функціонування транспортно-технологічного агрегату доцільно використовувати Евклідовий простір, як універсальний.

При досягненні значення одного або кількох функціональних параметрів граничних значень за нормативною документацією виникне нестабільність функціонування транспортно-технологічного агрегату в динамічному просторі.

Так, трактор у складі транспортно-технологічного агрегату може втратити функціональну стабільність і, як наслідок, не буде виконувати функції визначені нормативними вимогами при нестабільному значенні одного або кількох функціональних параметрів $v(t)$, $y_n(t)$, $y_z(t)$ і $w(t)$ якщо їх значення будуть відхилятися від визначених номінальних значень v^x , y_n^x , y_z^x і w^x . Динамічний простір буде визначений функціями W_v , W_{y_n} , W_{y_z} і W_w , що визначаються співвідношеннями $v(t)$, $y_n(t)$, $y_z(t)$ і $w(t)$ до v^x , y_n^x , y_z^x і w^x . Можна представити динамічний простір (ДП), як множину точок або векторів у визначеній метриці. Для транспортно-технологічного агрегату при аналізі його функціональної стабільності ДП є дискретною множиною точок в евклідовому просторі зі збуреннями по поздовжній x_1 , горизонтальній x_2 та вертикальній x_3 координатам (рис. 3, а) [10].



a – дискретна множина однотипних елементів (точок, векторів x' , x'' ,...);

б – фазова траєкторія при різних елементах

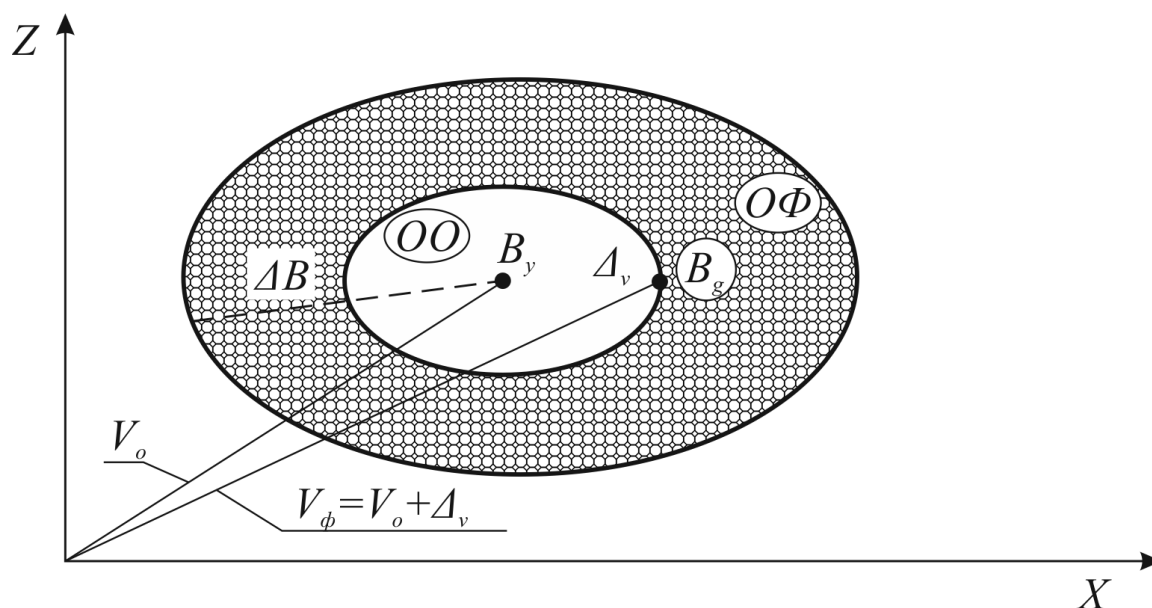
Рис. 3 – Графічна інтерпретація динамічного простору станів [10]

При дослідженні функціонування транспортно-технологічного агрегату в динамічному просторі, прикладне значення має аналіз випадку ($n=2$), тобто двовимірного, при цьому простір станів переходить в площину станів, або фазову площину станів. Для систем, які можна описати диференціальними рівняннями другого порядку (або системою двох диференціальних рівнянь другого порядку), для яких застосовується фазова площина, по абсцис відкладається координата x_1 , а по ординат відкладається її похідна $x_2 = \dot{x}_1$.

Рух по фазовій траєкторії відповідає ходу годинникової стрілки (рис. 3, б). У прикладному аспекті найбільш істотні результати одержані за допомогою фазової площини для систем з розривними характеристиками, які описуються різними диференціальними рівняннями для різних частин фазової площини, розділених так званою лінією перемикань (рис. 3.3, б).

Дослідження динамічних систем з використанням оговореного методу найбільш ефективно при нестабільних параметрах функціонування. Наприклад, при оцінці параметрів руху транспортно-технологічного агрегату: швидкості $v(t)$, стійкості $y_n(t)$ і ефективності гальмування $y_z(t)$ необхідно одночасно оцінити їх похідні, які є прискореннями або сповільненнями у відповідних площинах.

При роботі трактора у складі транспортно-технологічного агрегату необхідним є вирішення завдання щодо забезпечення функціонування у визначених межах двох областей: *ОФ* – область функціонування, де при роботі агрегату забезпечується стійкість напрямку руху, необхідне тягове зусилля та ефективність гальмування тощо; *ОО* – область оптимальної роботи, за визначеним критерієм енергозбереження, стійкості, якості виконання технологічної операції тощо. Визначальним параметром може бути прискорення агрегату при сталому режимі руху, оскільки по його значенню та напрямку достатньо чітко характеризує відхилення функціональних параметрів $v(t)$, $y_n(t)$, $y_z(t)$ і $w(t)$ від своїх номінальних значень. На рис. 4 точкою B_y показано режим функціонування в несталому режимі роботи без наявності прискорення, тобто його значення дорівнює нулю (квазістатичний режим руху) і B_g режим функціонування в допустимій області за критерієм енергозбереження (наявні незначні коливання прискорення).



Δ_v – запас функціонування в оптимальній області; V_o , V_ϕ – оптимальний та фактичний вектори функціонування; ΔB – запас функціонування в області функціонування.

Рис. 4 – Области оптимальної роботи (ОО) та функціонування (ОФ) транспортно-технологічного агрегату

Кожен режим роботи відповідає певній точці ОФ в даний момент часу і характеризується значеннями функціональних параметрів $v(t)$, $y_u(t)$, $y_z(t)$, $w(t)$ і зовнішніх збурюючих впливів $f_v(t)$, $f_{y_u}(t)$, $f_{y_z}(t)$ і $f_w(t)$. Відхилення точки B_g від точки B_y показує запас функціонування агрегату в оптимальній області Δ_v , який визначається за формулами:

$$\Delta B_z = \frac{Z_{jk} - Z_{jn}}{Z_{jn}} = \frac{\Delta Z_j}{\Delta Z_{jn}}; \Delta B_x = \frac{X_{ik} - X_{in}}{X_{in}} = \frac{\Delta X_i}{\Delta X_{in}}, \quad (15)$$

де Z_{jk}, Z_{jn} ; X_{ik}, X_{in} – критичні значення досліджуваного і граничного параметрів за координатами Z, X ; $\Delta Z_j, \Delta X_i$ – запас оптимального функціонування трактора за відповідними координатами при відхиленнях їх від номінальних значень 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 , тобто $V_\phi = V_o + \Delta_v$. В даному випадку для забезпечення роботи трактора в оптимальній області ОО (за рис. 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. Завдання формується таким чином. При відомих вимогах оптимального функціонування трактора в області ОО, яка визначається параметрами номінальними Z_{np} , поточними Z та допустимими Z_{ep} ($Z_{np} < Z < Z_{ep}$), щільності розподілу значення величини параметра з урахуванням його розкиду $f^0(x)$ відхилення $f'(x)$ потрібно визначити:

– ймовірність того, що значення параметра не вийде за задані допуски ($X_{np} < X < X_{ep}$) протягом певного часу експлуатації трактора з урахуванням збурюючих впливів;

– межі допуску ($X_{np} < X < X_{вр}$) і відповідні вимоги до трактора неперевикнення ймовірності виходу параметра за допуск заданої допустимої ймовірності;

– площини $f^0(x)$ і $f'(x)$, при яких будуть виконані умови того, що ймовірність виходу за допуск буде менше допустимої.

При вирішенні даного завдання всі функціональні параметри трактора класифікуються на параметри з заданими номінальними значеннями X_0^c (за рис. 1 – v^x , y_n^x , y_z^x і w^x) і на параметри, оптимальне значення яких необхідно визначити X_0^v (за рис. 4 – область ОО).

Функціональна стабільність трактора по стійкості напрямку руху $y_n(t)$ і гальмування $y_z(t)$, стабільності динамічних властивостей $w(t)$ (за рис. 1) можна представити аналогічно $v(t)$. В даному випадку критичні значення даних параметрів, які перебувають в області функціонування ОФ (за рис. 4), вибираються за даними експерименту. Для трактора на транспортно-технологічних роботах $\bar{v}(t)$ визначається оптимальним завантаженням двигуна; вектор $\bar{y}_n(t)$ оцінюється відповідно запасу стійкості прямолінійного руху і т.д. При оцінці функціональної стабільності трактора по декільком функціональним параметрам $y_1, y_2, \dots, y_n$ досліджується стійкість його роботи по відношенню до кожного з них.

Представлену методику доцільно використовувати для оцінки функціонування транспортно-технологічного агрегату при виконанні транспортних та транспортно-технологічних робіт, визначальними оціночними параметрами можуть бути швидкість та прискорення агрегату.

Висновки. Динамічний простір функціонування транспортно-технологічного агрегату дає можливість аналізувати зміну визначальних параметрів з використанням комплексного підходу. Експериментальні значення прискорення і швидкості руху з використанням методу «парціальних прискорень» дозволяють отримати вичерпну інформацію щодо характеру зміни параметрів роботи агрегату. Поєднання геометричної інтерпретації – динамічного простору та результатів експерименту дозволяють підвищити точність аналізу і можуть бути покладені в основу автоматичної системи управління режимами роботи транспортно-технологічного агрегату. З огляду на сучасні бортові системи трактора визначення оговорених параметрів відбувається штатними системами і не потребує додаткового встановлення експериментального обладнання. Відповідну інформацію можна отримати у дистанційному форматі або безпосередньо під'єднавшись до бортових систем трактора. Тому на даному етапі розвитку сучасної техніки автоматична система управління, яка базується на аналізі динамічного простору функціонування може, бути інтегрована до систем трактора або систем точного землеробства, у якості частини алгоритму управління роботою трактора.

Список літератури:

1. Артёмов М.П. Дослідження динаміки сил мобільного агрегату в неусталеному режимі моделювання парціальних прискорень / М. П. Артёмов // Вісник ЖНАЕУ : наук.-теорет. зб. - Житомир, 2014. - Вип. 2, Т. 4, Ч. 1. - С. 96-103.
2. Кожушко А. П. Теорія коливань трактора при транспортуванні цистерн сільськогосподарського призначення : монографія / А. П. Кожушко ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків : Мірошніченко О. А., 2021. – 239 с.
3. Шуляк М.Л. Оцінка функціонування сільськогосподарського агрегату за динамічними критеріями / М.Л. Шуляк, А.Т. Лебедев, М.П. Артёмов, Є.І. Калінін // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів, № 4, – 2016. с. 218-226.
4. Шевченко І. О. Тягово - енергетична оцінка трактора в складі сільськогосподарського агрегату змінної маси. Інженерія природокористування. 2021. № 2 (20). С. 94-99.
5. Лебедев А.Т., Шуляк М.Л., Лебедев С.А., Шапошник В.С., Подлесний А.В. Формування методології підвищення працездатності трактора в тяговому режимі за нестабільних параметрів стану. Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes. 2023; №3 (53): 60-67 <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.3.10>.

6. Метод парціальних прискорень та його застосування в динаміці мобільних машин. Монографія. За ред. М.А. Подригало та М.П. Артьомова. Харків: Вид-во "Естет Прінт", 2025. 232 с. ISBN 978-617-4403-01-0.
7. Лебедєв А.Т., Лебедєв С.А., Коробко А.І. Кваліметрія та метрологічне забезпечення випробувань тракторів. Харків: Вид-во «Міськдрук», 2018, 394с.
8. СОУ 71.2-37-0460430090-017:2015. Сільськогосподарська техніка. Визначення тягових показників тракторів. Метод парціальних прискорень [Надано чинності: 01.01.2016]. Дослідницьке, 2015. 9с. (Стандарт УкрНДІОВТ ім.. Л.Погорілого.).
9. Подригало М.А., Шелудченко В.В. Нове в теорії експлуатаційних властивостей автомобілів та тракторів. П44 Навч. посібн. Суми.: СНАУ, 2015. 213с.
10. Шуляк М.Л. Нестабільність функціональних параметрів трактора в динамічному просторі / М.Л. Шуляк // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. «Синергетика, мехатроніка, телематика дорожніх машин і систем у навчальному процесі та науці»: тези доп. – Х.: ХНАДУ, 16 березня 2017 р. – С. 176 - 177.

References (transliterated):

1. Artomov M.P. Doslidzhennia dynamiky syl mobilnoho ahrehatu v neustalenomu rezhymi modeliuvanniam partsialnykh pryskoren / M. P. Artomov // Visnyk ZhNAEU : nauk.-teoret. zb. - Zhytomyr, 2014. - Vyp. 2, T. 4, Ch. 1. - S. 96-103.
2. Kozhushko A. P. Teoriia kolyvan traktora pry transportuvanni tsystem silskohospodarskoho pryznachennia : monohrafiia / A. P. Kozhushko ; Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t". – Kharkiv : Miroshnychenko O. A., 2021. – 239 s.
3. Shuliak M.L. Otsinka funktsionuvannia silskohospodarskoho ahrehatu za dynamichnymy kryteriiamy / M.L. Shuliak, A.T. Lebediev, M.P. Artomov, Ye.I. Kalinin // Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv, № 4, – 2016. s. 218-226.
4. Shevchenko I. O. Tiahovo - enerhetychna otsinka traktora v skladi silskohospodarskoho ahrehatu zminnoi masy. Inzheneriia pryrodokorystuvannia. 2021. № 2 (20). S. 94-99.
5. Lebediev A.T., Shuliak M.L., Lebediev S.A., Shaposhnyk V.S., Podliesnyi A.V. Formuvannia metodolohii pidvyshchennia pratsezdatsnosti traktora v tiahovomu rezhymi za nestabilnykh parametriv stanu. Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes. 2023; №3 (53)): 60-67 <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.3.10>.
6. Metod partsialnykh pryskoren ta yoho zastosuvannia v dynamitsi mobilnykh mashyn. Monohrafiia. Za red. M.A. Podryhalo ta M.P. Artomova. Kharkiv: Vyd-vo "Estet Print", 2025. 232 s. ISBN 978-617-4403-01-0.
7. Lebediev A.T., Lebediev S.A., Korobko A.I. Kvalimetriia ta metrolohichne zabezpechennia vyprobuvan traktoriv. Kharkiv: Vyd-vo «Miskdruk», 2018, 394s.
8. SOU 71.2-37-0460430090-017:2015. Silskohospodarska tekhnika. Vyznachennia tiahovykh pokaznykiv traktoriv. Metod partsialnykh pryskoren [Nadano chynnosti: 01.01.2016]. Doslidnytske, 2015. 9s. (Standart UkrNDIOVT im.. L.Pohoriloho.).
9. Podryhalo M.A., Sheludchenko V.V. Nove v teorii ekspluatatsiinykh vlastyvostei avtomobiliv ta traktoriv. P44 Navch. posibn. Sumy.: SNAU, 2015. 213s.
10. Shuliak M.L. Nestabilnist funktsionalnykh parametriv traktora v dynamichnomu prostori / M.L. Shuliak // Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. «Synerhetyka, mekhatronika, telematyka dorozhnikh mashyn i system u navchalnomu protsesi ta nautsi»: tezy dop. – Kh.: KhNADU, 16 bereznia 2017 r. – S. 176 - 177.

Надійшла (received) 10.05.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Шуляк Михайло Леонідов (Mykhailo Shuliak) – доктор технічних наук, професор, Сумський національний аграрний університет, завідувач кафедри агроінжинірингу, м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7286-6602>; e-mail: m.l.shulyak@gmail.com

Лебедєв Анатолій Тихонович (Anatoliy Lebedev) – доктор технічних наук, професор, Сумський національний аграрний університет, професор кафедри агроінжинірингу, м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1975-3323>; e-mail: tiaxntusg@gmail.com

Барабаш Григорій Іванович (Hryhorii Barabash) – кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет, доцент кафедри агроінжинірингу, м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1075-479X>, e-mail: barabashgi@ukr.net

Шелест Микола Сергійович (Mykola Shelest) – здобувач ВО PhD, Сумський національний аграрний університет, фсисент кафедри агроінжинірингу, м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5722-8944>, e-mail: koladj1992@gmail.com