

УДК 631.3-182

ОПТИМІЗАЦІЯ ШВИДКІСНОГО РЕЖИМУ ПЕРЕМІЩЕННЯ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТУ З УРАХУВАННЯМ РЕЛЬЄФУ ПОЛЯ

В.С. Ловейкін, доктор технічних наук, професор

Ю.В. Човнюк, кандидат технічних наук, доцент

Л.А. Дяченко, здобувач

Національний університет біоресурсів і природокористування України

К.М. Думенко, кандидат технічних наук, доцент

К.С. Шевченко, лаборант

Миколаївський державний аграрний університет

Проведено аналіз закономірностей швидкісного режиму переміщення машинно-тракторного агрегату з урахуванням рельєфу оброблюваного поля. Визначено основні його кінематичні характеристики та оптимізовано енергосилові параметри руху.

Ключові слова: машинно-тракторний агрегат, енергосилові параметри руху, оптимізація швидкісних режимів руху.

Постановка проблеми. За умови забезпечення оптимального завантаження робочими машинами мобільних енергетичних засобів можливе комплектування машинно-тракторних агрегатів. Існує усталений критерій оптимізації подібних механічних систем – це рівень завантаження двигуна агрегату, котрий, на жаль, не пов'язаний ніяким чином з самим швидкісним режимом руху останнього. Оператор машинно-тракторного агрегату заданий режим обирає самостійно, виходячи з власного досвіду та наявної кваліфікації. Проте такий підхід зовсім не забезпечує оптимальні (мінімальні) витрати енергії під час виконання конкретної технологічної операції, у якій використовується мобільний агрегат. Більш того, витрати енергії можуть суттєво перевищувати необхідну для якісного виконання вказаного процесу величину (за умов дотримання при цьому існуючих агротехнічних вимог). Особливо відчутними витрати енергії проявляються при виконанні на

оброблюваних полях з вираженим рельєфом необхідних операцій. Отже оптимізація швидкісних режимів руху пересування машинно-тракторних агрегатів на полях зі знакозмінним кутом нахилу їх поверхонь до горизонту при виконанні ними необхідних операцій технологічного процесу є актуальною задачею що вимагає швидкого коректного розв'язку.

Аналіз останніх публікацій за темою досліджень. Відомо [2-4], що на сучасному етапі розвитку досліджень у сфері оптимізації швидкісних режимів руху машинно-тракторних агрегатів (МТА) планується підхід, пов'язаний з вдосконаленням самих енергетичних засобів, підвищенням їх потужностей, що призводить до надійної роботи технологічних машин. При цьому, зрозуміло, зростає експлуатаційна маса МТА та енергетичні витрати, необхідні для виконання технологічного процесу.

Автори [1] намагалися визначити оптимальний швидкісний режим руху МТА з урахуванням рельєфу оброблюваного поля у вертикально-повздовжній площині, що повинно було б забезпечити мінімальні витрати енергії вказаного агрегату. Проте постановка задачі, метод її розв'язку, подані у цитованій роботі не є коректні, а чисельний розв'язок відповідної варіаційної задачі на ПЕОМ практично не підлягає перевірці, оскільки складається з великої кількості складових (додатків) з великими коефіцієнтами (>1), що отримані за допомогою комп'ютерних обчислень, і тому можуть бути недостовірними (все залежить від обчислювальної потужності) ПЕОМ, точності розрахунків та самої програми для комп'ютера, яка при цьому використовується). Крім того, існує проблема у визначенні розмірностей отримуваних при такому підході величин.

Наведені вище обставини примусили авторів даної роботи здійснити коректну постановку задачі, розв'язати її за допомогою класичних методів варіаційного числення, а отримані аналітичні залежності перевірити чисельними розрахунками на ПЕОМ.

Мета роботи полягає у встановленні основних кінематичних параметрів оптимального швидкісного режиму руху МТА з урахуванням рельєфу оброблюваного поля у вертикально-

повздовжній площині, котрий забезпечує мінімальні витрати енергії для проведення конкретних технологічних операцій. Для досягнення мети даної роботи використано класичні методи варіаційного числення (зокрема, рівняння Ейлера-Пуассона) та стандартні програми чисельного розв'язку нелінійних диференціальних рівнянь.

Виклад основного змісту дослідження. Розглянемо динаміку переміщення МТА по поверхні поля з метою розв'язку задачі оптимізації режимів його руху. Схема, яка використана для складання рівняння руху МТА, подана на рис.1 [1].

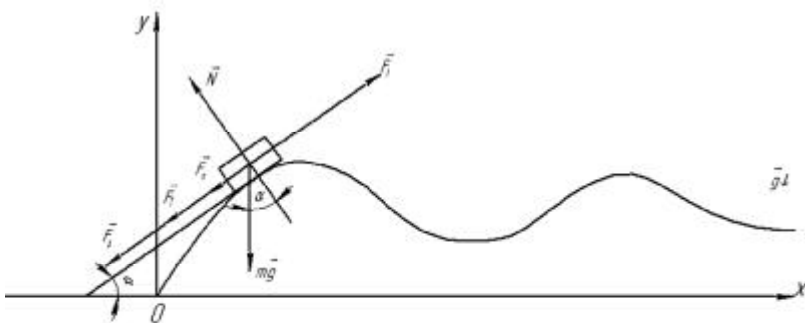


Рис.1. Розрахункова схема задачі

Проектуючи рівняння руху МТА на натуральні вісі координат (траєкторія руху по поверхні поля, яке обробляється), матимемо [1]:

$$m\ddot{s} + F_p + F_T + F_n = F_t, \quad (1)$$

де введено такі позначення:

t – час;

m – маса МТА;

\ddot{s} – прискорення агрегату у проекції на напрям руху;

v – лінійна швидкість руху;

$F_p = P_p v^2$ – тяговий опір робочої машини;

P_p – динамічний коефіцієнт функції тягового опору;

$F_n = N k_n$ – опір перекочуванню коліс агрегату;

$N = mg \cos \alpha$ – нормальна реакція опори (поверхні поля);

k_n – коефіцієнт перекочування;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння;

$FT = mg \sin \alpha$ – проекція ваги на напрямок руху МТА;

$F_t = N^* / v$ – тягове зусилля на рушійх енергозасобу;

N^* – потужність, приведена до рушіїв енергозасобу агрегату.

Слід зазначити, що у рівнянні (1) не представлена відцентрова сила, яка діє на МТА внаслідок його руху вподовж опуклої поверхні (у зв'язку з її малим значенням).

Використовуючи (1), легко знайти значення $N^*(t)$:

$$N^* = mv^2 + P_p v^3 + mgv[k_n \cos \alpha + \sin \alpha]. \quad (2)$$

Тоді повна енергія, яку витрачає МТА за час руху T , визначається з функціоналу:

$$E = \int_0^T N^* dt = \int_0^T (mv^2 + P_p v^3 + mgv[k_n \cos \alpha + \sin \alpha]) dt. \quad (3)$$

Метою є знаходження такого закону руху МТА $v(t)$, за якого виконується умова (критерій):

$$E \rightarrow \min. \quad (4)$$

Кут α нахилу дотичної до траєкторії руху агрегату відносно осі ОХ при заданій формі поверхні поля $y = f(x)$ визначаємо з виразу:

$$\alpha = \arctg \left\{ \frac{dy}{dx} \right\}. \quad (5)$$

Поверхню поля у загальному випадку задає рівняння [1]:

$$y = \alpha \cos(bx). \quad (6)$$

Тоді для тригонометричних функцій кута α маємо:

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + a^2 b^2 \sin^2(bx)}}; \quad \sin \alpha = \frac{ab \sin(bx)}{\sqrt{1 + a^2 b^2 \sin^2(bx)}}. \quad (7)$$

З урахуванням (5) – (7), а також обставини, що:

$$v = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2}, \quad v = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \frac{dx}{dt} = \sqrt{1 + a^2 b^2 \sin^2(bx)} \frac{dx}{dt}, \quad (8)$$

функціонал (3) та критерій якості руху МТА (4) набувають виду:

$$\int_0^T \left\{ m \left[\frac{a^2 b^3 \sin 2bx}{2} (\ddot{x})^3 + \ddot{x} \left(1 + a^2 b^2 \sin^2 bx \right) \right] + \right. \\ \left. + P_p (1 + a^2 b^2 \sin^2 bx)^{3/2} (\ddot{x})^3 + mg [k_n + ab \sin bx] \ddot{x} \right\} dt \Rightarrow \min. \quad (9)$$

Вираз (9) можна подати таким чином:

$$\int_0^T F(\ddot{x}, x) dt \Rightarrow \min. \quad (10)$$

Тоді рівняння Ейлера-Пуассона, як необхідна умова існування екстремуму (зокрема, **min**) функціоналу $F(\ddot{x}, x)$ може бути подане у вигляді:

$$\frac{\partial F}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{x}} \right) + \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial F}{\partial \ddot{x}} \right) = 0. \quad (11)$$

Знаючи розв'язок (11) у вигляді $x(t)$, можна знайти з (8) $v(t)$. Проте, для повного виконання критерію оптимальності пересування МТА з урахуванням рельєфу треба перевірити ще й достатню умову реалізації екстремуму (**min**) (10).

Складові рівняння (11) можна знайти зі співвідношень:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial \ddot{x}} &= m \ddot{x} (1 + a^2 b^2 \sin^2 bx); \\ \frac{\partial F}{\partial \dot{x}} &= m \left[\frac{3}{2} a^2 b^3 \sin 2bx (\ddot{x})^2 + \ddot{x} (1 + a^2 b^2 \sin^2 bx) \right] + \\ &+ 3P_p (1 + a^2 b^2 \sin^2 bx)^{3/2} (\ddot{x})^2 + mg [k_n + ab \sin bx]; \\ \frac{\partial F}{\partial x} &= m \left[a^2 b^3 b \sin 2bx (\ddot{x})^3 + \ddot{x} (a^2 b^3 2 \sin bx \cos bx b) \right] + \\ &+ P_p (\ddot{x})^3 \frac{3}{2} (1 + a^2 b^2 \sin^2 bx)^{1/2} a^2 b^2 2 \sin bx \cos bx b + mg \ddot{x} ab \cos bx b = \\ &= m \left[a^2 b^4 \sin 2bx (\ddot{x})^3 + \ddot{x} (a^2 b^3 \sin 2bx) \right] + mg \ddot{x} ab^2 \cos bx + \\ &+ P_p (\ddot{x})^3 \frac{3}{2} (1 + a^2 b^2 \sin^2 bx)^{1/2} a^2 b^3 2 \sin bx. \end{aligned} \right. \quad (12)$$

1. Для $ab \ll 1$ маємо суттєві спрощення у (12):

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial \dot{x}} = m \dot{x}, \quad \frac{\partial F}{\partial \dot{\varphi}} = m \dot{\varphi} + 3P_p (\dot{\varphi})^2 + mg [k_n + ab \sin bx]; \\ \frac{\partial F}{\partial x} = mg ab^2 \cos bx. \end{cases} \quad (13)$$

Тоді (11) набуває вигляду:

$$mg ab^2 \cos bx - [m \dot{\varphi} + 3P_p \dot{\varphi} + mg ab^2 \cos bx] + m \ddot{\varphi} = 0, \quad (14)$$

або:

$$\ddot{\varphi} = 0. \quad (15)$$

Це рівняння дає два тривіальні розв'язки:

а) $\dot{\varphi} = 0$ (рух відсутній); б) $\dot{\varphi} = 0$ (рух рівномірний). (16)

2. Для випадку $ab = 1$ з (12) можна знайти:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial \dot{\varphi}} = m \dot{\varphi} (1 + \sin^2 bx); \\ \frac{\partial F}{\partial \dot{x}} = m \left[\frac{3}{2} b \sin 2bx (\dot{\varphi})^2 + \dot{\varphi} (1 + \sin^2 bx) \right] + \\ + 3P_p (1 + \sin^2 bx)^{3/2} (\dot{\varphi})^2 + mg [k_n + \sin bx]; \\ \frac{\partial F}{\partial x} = m \left[b^2 \sin 2bx (\dot{\varphi})^3 + 3 \dot{\varphi} \cdot \sin 2bx \right] + mg \dot{\varphi} \cos bx + \\ + P_p (\dot{\varphi})^3 \frac{3}{2} (1 + \sin^2 bx)^{1/2} b^2 \sin bx. \end{cases} \quad (17)$$

Підставляючи (17) у рівняння (11), після нескладних перетворень отримаємо:

$$\dot{\varphi} = 0; \quad \dot{\varphi} + \frac{(\dot{\varphi})^2 b \sin 2bx}{2(1 + \sin^2 bx)} = 0. \quad (18)$$

Перше рівняння у парі (18) не має фізичного змісту (МТА не рухається).

Розв'язок другого рівняння (18) знайдемо чисельними методами на ПЕОМ для таких значень параметрів:

1) $b = 1 \text{ м}^{-1}$; $a = 1 \text{ м}$; $L = 2\pi/b = 2\pi, \text{ м}$;

2) $b = 2 \text{ м}^{-1}$; $a = 0,5 \text{ м}$; $L = \pi, \text{ м}$;

3) $b = \pi, \text{ м}^{-1}$; $a = 1/\pi, \text{ м}$; $L = 2 \text{ м}$;

4) $b = 2\pi, \text{ м}^{-1}$; $a = 1/2 \pi, \text{ м}$; $L = 1 \text{ м}$.

Знаючи закон зміни $x(t)$, $\dot{x}(t)$, $\ddot{x}(t)$, легко знайти, користуючись (6), (8):

$$\begin{cases} v(t) = \sqrt{1 + \sin^2(bx)} \cdot \dot{x}(t); & y(t) = \frac{1}{b} \cos(bx(t)); \\ \dot{x}(t) = -\sin(bx) \cdot \dot{x}(t); & \ddot{x}(t) = -\ddot{x}(t) \sin(bx) - (\dot{x})^2 b \cos(bx). \end{cases} \quad (19)$$

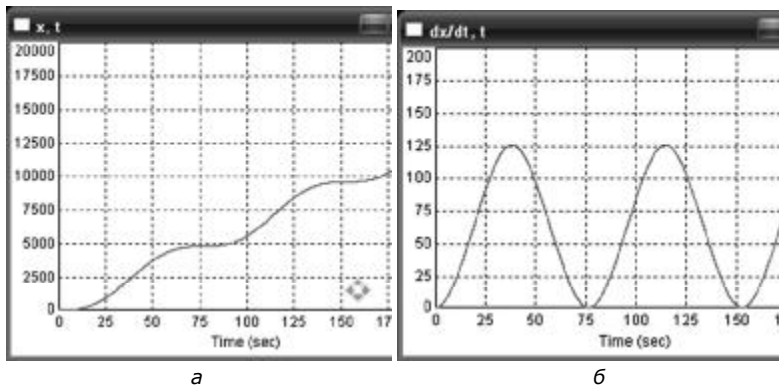
Крім того, знайдено фазові портрети руху МТА: (x, \dot{x}) ; (y, \dot{y}) .

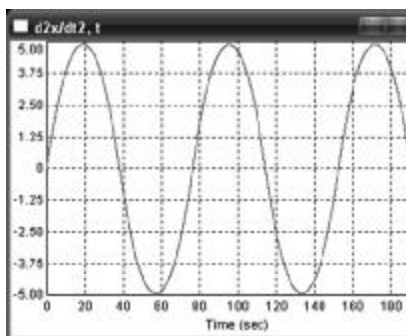
Закон руху $S(t)$ МТА можна знайти з виразу:

$$S = \int_0^T \sqrt{1 + \sin^2(bx)} \cdot \dot{x}(\tau) d\tau, \quad (20)$$

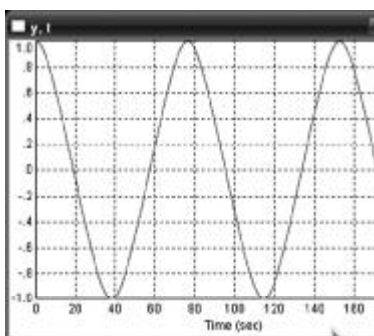
$$S(T) = \int_0^T \sqrt{1 + \sin^2(bx)} \cdot \dot{x}(\tau) d\tau.$$

На рис.2 наведено вказані залежності від часу та геометричних параметрів нерівності, вдововж котрої рухається МТА.

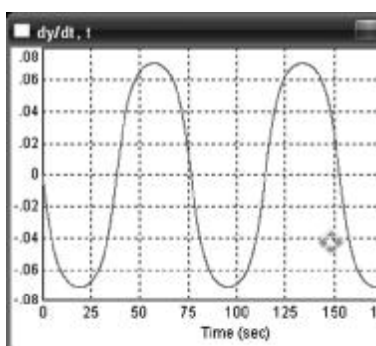




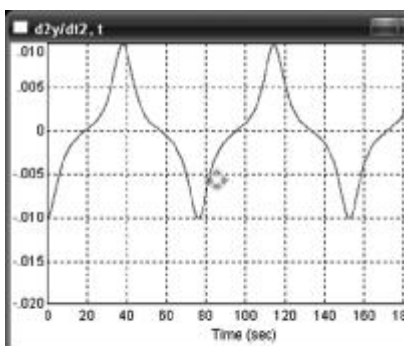
В



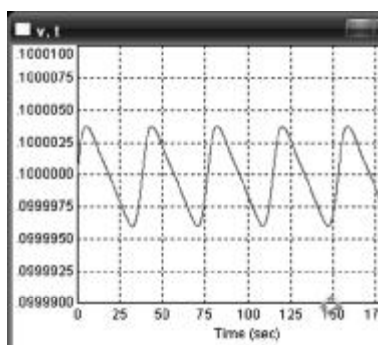
Г



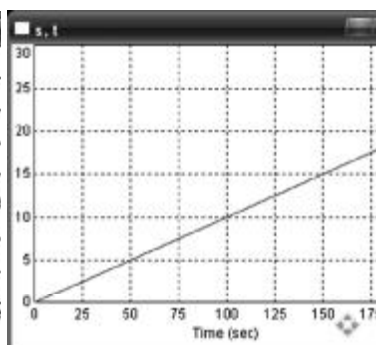
Д



е



Є



Ж

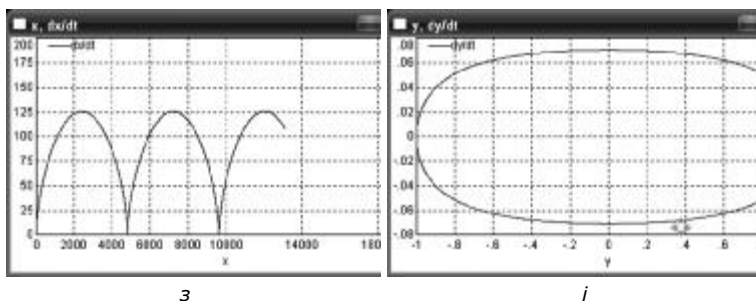


Рис.2. Залежності $a - x(t)$, $b - \dot{x}(t)$, $v - \ddot{x}(t)$, $g - y(t)$, $d - \dot{y}(t)$, $e - \ddot{y}(t)$, $\epsilon - v(t)$, $ж - S(t)$, $з - (x; \dot{x})$, $i - (y; \dot{y})$ при значеннях $b = 1 \text{ м}^{-1}$; $a = 1 \text{ м}$; $L = 2\pi/b = 2\pi$, м.

Висновки.

1. Застосування методів класичного варіаційного числення за наявності зв'язків у вигляді особливостей геометричних нерівностей поверхні дозволяє оптимізувати режим руху МТА з урахуванням рельєфу. Реалізація саме такого режиму руху МТА мінімізує необхідну потужність для руху останнього за наявних сил опору.

2. Отримані у роботі результати можуть у подальшому використовуватися для вдосконалення автоматичних керувань режимом руху агрегатів сільськогосподарського призначення.

Література:

1. Гуцол О. П. Обґрунтування швидкісного режиму переміщення машинно-тракторного агрегату / О. П. Гуцол, В. П. Ковбаса, В. О. Соломка // Сільськогосподарські машини : зб. наук. ст. — Т.1, Вип. 21. — Луцьк : ЛНТУ, 2011. — 333 с. — С. 96—104.
2. Цлаф Л. Я. Вариационное исчисление и интегральные уравнения : справочное руководство / Л. Я. Цлаф. — М. : Наука, 1966. — 176 с.
3. Нові мобільні енергетичні засоби України. Теоретичні основи використання у землеробстві : навчальний посібник / В. Т. Надикто, М. Л. Крижачківський, В. М. Кюрчев, С. Л. Абдула. — Мелітополь, 2005. — 338 с.
4. Рославцев А. В. Особенности современных исследований движения транспортно-технологических средств / А. В. Рославцев, С. Н. Шитченко // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 2004. — № 6. — С. 28—30.