

Мазоренко Дмитро Іванович,
кандидат технічних наук, професор,
професор кафедри сільськогосподарських
машин та інженерії тваринництва
Державного біотехнологічного
університету

Антощенко Роман Вікторович,
доктор технічних наук, професор, завідувач
кафедри мехатроніки, безпеки
життєдіяльності та управління якістю
Державного біотехнологічного
університету

Галич Іван Васильович,
кандидат технічних наук, доцент, доцент
кафедри мехатроніки, безпеки
життєдіяльності та управління якістю
Державного біотехнологічного
університету

Mazorenko Dmytro,
PhD, Professor, Professor of the Department of
Agricultural Machinery and Animal Husbandry
Engineering, State Biotechnological University,
<https://orcid.org/0000-0001-5129-6014>

Antoshchenkov Roman,
PhD, Professor, Professor of the Department of
Agricultural Machinery and Animal Husbandry
Engineering, State Biotechnological University,
<https://orcid.org/0000-0003-0769-7464>

Halych Ivan,
PhD, Associate Professor, Associate Professor
of the Department of Mechatronics, Life
Safety and Quality Management, State
Biotechnological University,
<https://orcid.org/0000-0002-9137-036X>

ДИНАМІКА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИТРАТ БАГАТОЕЛЕМЕНТНИХ ТЯГОВО-ТРАНСПОРТНИХ МАШИН DYNAMICS OF ENERGY CONSUMPTION OF MULTI-ELEMENT TRACTION TRANSPORT MACHINES

Мазоренко Д. І., Антощенко Р. В., Галич І. В.
Динаміка енергетичних витрат
багатоелементних тягово-транспортних
машин. *Український журнал прикладної
економіки та техніки*.
2022. Том 8. № 1. С. 344 – 349.

Mazorenko D., Antoshchenkov R., Halych I.
Dynamics of energy consumption of multi-
element traction transport machines.
*Ukrainian Journal of Applied
Economics and Technology*.
2022. Volume 8. № 1, pp. 344 – 349.

Наведено результати дослідження енергетичних витрат багатоелементних тягово-транспортних машин. Обґрунтовано метод визначення енергетичних витрат тягово-транспортних машин. Теоретично визначено енергетичні витрати багатоелементного сільськогосподарського агрегату. Наведено результати експериментальних досліджень багатоелементних тягово-транспортних машин на прикладі сільськогосподарського агрегату у складі трактора John Deere 8345R, бункера для посівного матеріалу John Deere 1910 та сівалки прямої сівки John Deere 1895. Запропонований метод визначення енергетичних витрат дозволяє оцінити витрати енергії машиною загалом або її елементами. Елементи багатоелементних тягово-транспортних машин під час аналізу енергетичних витрат становлять собою енергетично-динамічні моделі у вигляді рівнянь простору стану, що дозволяє гнучке формування систем рівнянь при зміні складу та послідовності елементів багатоелементної досліджуваної машини. Розглянуто три способи з'єднання енергетично-динамічних моделей елементів: паралельне та послідовне з'єднання та з'єднання зі зворотним зв'язком. Встановлено, що енергетичні витрати елементами сільськогосподарського агрегату змінюються за гармонійним законом з періодом 7,5 с і перехідним процесом на початку руху. Найбільші витрати енергії відбуваються в сівалці 3,7·10⁶ Дж з розмахом 0,15·10⁶ Дж. Енергетичні витрати трактора та бункера дорівнюють 2,7·10⁶ Дж і 3,25·10⁶ Дж з розмахом 0,1·10⁶ Дж і 0,15·10⁶ Дж. Експериментальні дослідження виконані з використанням вимірювальної системи динаміки та енергетики мобільних машин. Коливання енергетичних витрат на передніх колесах перебувають в однаковій фазі, а задніх у протифазі та складають 7,25·10⁵ Дж з розмахом 0,5·10⁵ Дж – для переднього лівого колеса; 7,55·10⁵ Дж з розмахом 0,5·10⁵ Дж – переднього правого; 6,25·10⁵ Дж з розмахом 0,4·10⁵ Дж – для задніх коліс.
Ключові слова: енергетичні витрати, метод оцінювання, багатоелементна тягово-транспортна машина, енергія.

The results of the study of energy costs of multi-element traction transport machines are presented. The method of determining the energy costs of traction transport machines is substantiated. The energy costs of a multi-element agricultural unit are theoretically determined. The results of experimental studies of multi-element traction transport machines on the example of an agricultural unit consisting of a John Deere 8345R tractor, a hopper for John Deere 1910 seed and John Deere 1895 direct seeders. The proposed method for determining energy costs allows estimating the energy consumption of the machine as a whole or its elements. Elements of multi-element traction transport machines in the analysis of energy costs are energy-dynamic models in the form of equations of state space, which allows flexible formation of systems of equations when changing the composition and sequence of elements of the multi-element machine under study. Three ways of connecting energy-dynamic models of elements are considered: parallel and series connection and connection with feedback. It has been established that the energy expenditure by the elements of the

agricultural aggregate varies according to the harmonic law with a period of 7.5 s and a transient process at the beginning of movement. The highest energy expenditure occurs in the planter 3.7·10⁶ J with a span of 0.15·10⁶ J. The energy consumption of the tractor and hopper is 2.7·10⁶ J and 3.25·10⁶ J with a span of 0.1·10⁶ J and 0.15·10⁶ J. Experimental studies were carried out using the measuring system of dynamics and energy of mobile machines. The fluctuations in energy consumption on the front wheels are in the same phase and those on the rear wheels are in antiphase and amount to 7.25·10⁵ J with a span of 0.5·10⁵ J for the front left wheel; 7.55·10⁵ J with a span of 0.5·10⁵ J – front right; 6.25·10⁵ J with a span of 0.4·10⁵ J – for the rear wheels.

Keywords: energy costs, estimation method, multi-element traction transport machine, energy.

Вступ

Освоєння енергоощадних технологій у машинобудуванні є одним з пріоритетних напрямів його розвитку. Водночас першочерговими за актуальністю завдання є розроблення методів енергетичного оцінювання застосування технологій і зниження енерговитрат тягово-транспортними машинами [1].

Підвищення енергетичної ефективності багатоеlementних тягово-транспортних машин (БТТМ) є складним завданням через багатоступеневість його структури та через надвелику кількість керованих і некерованих показників, що впливають на процес функціонування.

Функціонування БТТМ у процесі виконання технологічних операцій відбувається шляхом витрати енергії на їх переміщення та подолання опору робочого середовища. Джерелом енергії у мобільних машин є ДВЗ. Останніми роками спостерігається підвищення енергетичної потужності машин, що досягається підвищенням потужності двигунів, що призводить до підвищення споживання паливо-мастильних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сукупні енергетичні витрати при використанні БТТМ складаються з прямих витрат пального та живої праці, а також непрямих витрат на ремонт та обслуговування машини [2].

У дослідженні з визначення ефективної маси елемента машини [3] не враховано енергетичну взаємодію між елементами, а досліджено одноelementну машину загалом.

Проектування мехатронного гідравлічного мотора, що описано у роботі [4], враховує енергетичні витрати окремого досліджуваного мотора без урахування перехідних процесів у гідравлічній системі. У роботі [5] досліджено кінематику розробленого гідравлічного мотора без урахування енергетичних витрат.

Комп'ютерне моделювання багатомасових систем виконано без урахування методів оцінювання енергетичних витрат як системою загалом, так і окремими елементами [6]. Дослідження динаміки машин потребує визначенням положення центра мас [7]. Зміна положення центра мас машини вимагає уточнення визначення енергетичних витрат.

Під час енергетичного оцінювання визначають витрати потужності машиною на виконання технологічних операцій під час оптимального і максимального режимів роботи [8], однак оцінювання виконано для одноelementної машини.

З аналізу джерел інформації встановлено, що необхідно обґрунтувати метод дослідження енергетичних процесів, що відбуваються в багатоеlementних тягово-транспортних машинах довільних структур, і визначити шляхи зменшення витрат енергії.

Формулювання цілей статті

Мета статті: підвищення енергоефективності багатоеlementних тягово-транспортних машин шляхом обґрунтування енергетичних витрат. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання: обґрунтувати метод визначення енергетичних витрат БТТМ; теоретично дослідити енергетичні витрати багатоеlementного сільськогосподарського агрегату; провести експериментальні дослідження БТТМ на прикладі сільськогосподарського агрегату для підтвердження адекватності запропонованого методу.

Виклад основного матеріалу дослідження

Дослідження енергетики функціонування БТТМ довільних структур потребує створення теорії, яка дозволить визначати витрати енергії окремими їхніми елементами та має гнучкість до змінення структури машини та внутрішніх параметрів.

В експлуатаційних умовах роботи БТТМ та її елементи можна розглядати як динамічні системи (об'єкти загалом), на вхід якої діють вектор вхідних умов і параметрів керування $\vec{u} = \{u_1, u_2, \dots, u_i\}$ і вектор збурювального впливу $\vec{v} = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$; на виході динамічної системи маємо вектор вихідних параметрів $\vec{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$. Кількість i вхідних, k збурювальних і m вихідних параметрів функціонування залежить від типу агрегату, обраної розрахункової схеми, кількості врахованих умов роботи агрегату та інших факторів [1].

Уявімо елемент БТТМ як математичну модель об'єкта в змінному стані, що складається з двох рівнянь: рівняння стану; рівняння виходу.

Рівняння стану елемента БТТМ як лінійного багатовимірного об'єкта у виді векторних диференціальних рівнянь у формі Коші мають вигляд:

$$\dot{X}(t) = A \cdot X(t) + B \cdot U(t) + v(t), \quad (1)$$

де $X(t) = [x_i(t)]_{n \times 1}$ – вектор стану; $U(t) = [u_j(t)]_{m \times 1}$ – вектор керування; $v(t) = [v_i(t)]_{n \times 1}$ – вектор збурень, що діють на об'єкт; $A = [a_{ij}]_{n \times n}$, $B = [b_{ij}]_{n \times m}$ – матриці коефіцієнтів, що визначаються параметрами об'єкта.

Матриці коефіцієнтів A та B для $n \times m$ параметрів керування і стану мають вигляд:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & b_{mm} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Векторному диференціальному рівнянню (2) відповідає система n скалярних диференціальних рівнянь першого порядку:

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j(t) + \sum_{j=1}^m b_{ij} u_j(t) + v_i(t), \quad (3)$$

де $i = 1, \dots, 2, n$.

Рівняння виходу моделі елемента БСА у векторній формі має вигляд:

$$Y(t) = C \cdot X(t) + D \cdot U(t), \quad (4)$$

де $Y(t) = [y_i(t)]_{l \times 1}$ – вектор вихідних станів об'єкта; $C = [c_{ij}]_{l \times n}$ – матриця спостереження; $D = [d_{ij}]_{l \times m}$ – матриця постійних коефіцієнтів, що характеризують безінерційний вплив керівних дій на вихід об'єкта. У матричному вигляді:

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1l} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{l1} & c_{l2} & \dots & c_{ll} \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \dots & d_{mm} \end{bmatrix}.$$

Векторному рівнянню (4) еквівалентна система l скалярних рівнянь, що має вигляд:

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^n c_{ij} x_j(t) + \sum_{j=1}^m d_{ij} u_j(t), \quad (5)$$

де $i = 1, 2, \dots, l$.

Перетворення моделі динаміки елемента БТТМ до вигляду (3), (5) або відповідно до матричного вигляду (2), (4) дозволяє представити її як об'єкт автоматичного керування та досліджувати функціонування елемента, використовуючи методи теорії автоматичного керування.

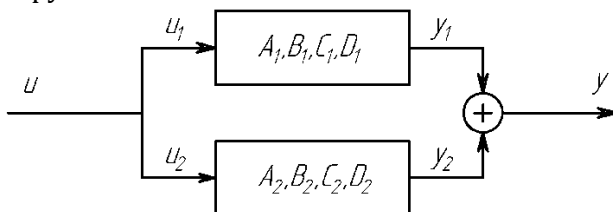


Рис. 1. Паралельне з'єднання ЕДМ елементів агрегату

Елементи БТТМ, такі як двигун, трансмісія, рушії і сільськогосподарські машини, мають різноманітну структуру та способи з'єднання, відповідно, передачу і витрату енергії [1]. Такі елементи під час аналізу енергетичних витрат та оцінювання взаємозв'язку з динамікою становлять собою енергетично-динамічні моделі (ЕДМ).

Розглянемо найбільш поширені способи з'єднання енергетично-динамічних моделей елементів БТТМ. Паралельне з'єднання ЕДМ наведено на рис. 1.

Запишемо рівняння системи з урахуванням особливостей паралельного з'єднання ЕДМ:

$$\dot{X}_1 = A_1 X_1 + B_1 U; \dot{X}_2 = A_2 X_2 + B_2 U; Y = C_1 X_1 + C_2 X_2 + D_1 U_1 + D_2 U_2, \quad (6)$$

або в матричному вигляді:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} \cdot U.$$

У випадку послідовного з'єднання ЕДМ елементів БТТМ вихід першого елемента подається на вхід другого. Такий варіант зображено на рис. 2.

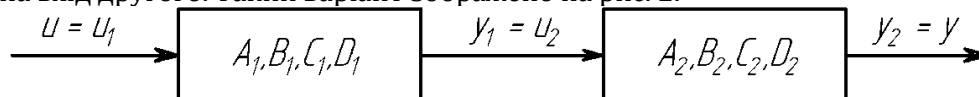


Рис. 2. Послідовне з'єднання ЕДМ елементів агрегату

Рівняння послідовного з'єднання ЕДМ у формі матричних рівнянь має вигляд:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & 0 \\ B_2 \cdot C_1 & A_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \cdot D_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix};$$

$$Y = (D_2 \cdot C_1 \quad C_2) \cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} + (D_1 \quad D_2) \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

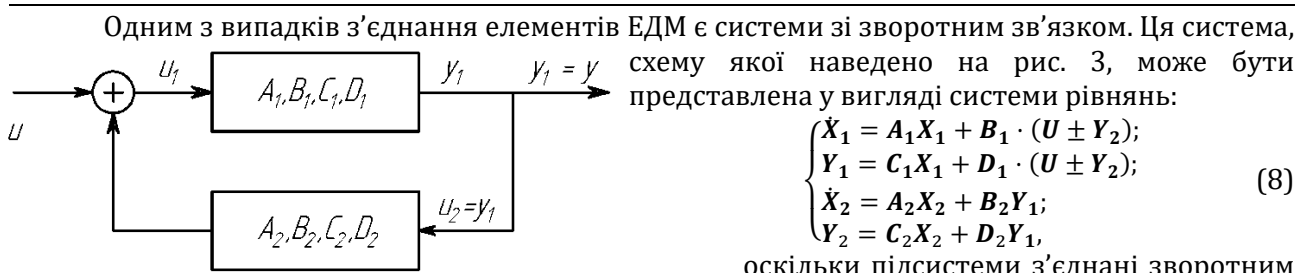


Рис. 3. З'єднання ЕДМ елементів агрегату зі зворотним зв'язком

оскільки підсистеми з'єднані зворотним зв'язком, то, підставивши вираз Y_1 в (8) та розрахувавши відносно Y_2 , отримаємо:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU; \\ Y = CX + DU, \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{де } A = \begin{bmatrix} A_1 \pm \frac{B_1 D_2 C_1}{1 \mp D_1 D_2} & \pm \frac{B_1 C_2}{1 \mp D_1 D_2} \\ B_2 C_1 \pm \frac{B_2 D_1 D_2 C_1}{1 \mp D_1 D_2} & A_2 \pm \frac{B_2 D_1 C_2}{1 \mp D_1 D_2} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} B_1 \pm \frac{B_1 D_1 D_2}{1 \mp D_1 D_2} \\ B_2 D_1 \pm \frac{B_2 D_1 D_1 D_2}{1 \mp D_1 D_2} \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} C_1 \pm \frac{D_1 D_2 C_1}{1 \mp D_1 D_2} & \pm \frac{D_1 C_2}{1 \mp D_1 D_2} \end{bmatrix}; D = D_1 \pm \frac{D_1 D_1 D_2}{1 \mp D_1 D_2}.$$

Запропонований метод оцінювання енергетичних витрат функціонування БТТМ за допомогою опису елементів систем як енергетично-динамічних моделей у вигляді рівнянь простору стану дозволяє гнучке формування систем рівнянь під час зміни складу та послідовності елементів багатоелементної досліджуваної машини.

Розглянемо енергетично-динамічну модель БТТМ на прикладі трактора John Deere 8345R, бункера для посівного матеріалу John Deere 1910 та сівалки прямої сівби John Deere 1895 (рис. 4). ЕДМ якого складається з восьми елементів, що мають послідовне та паралельне з'єднання.

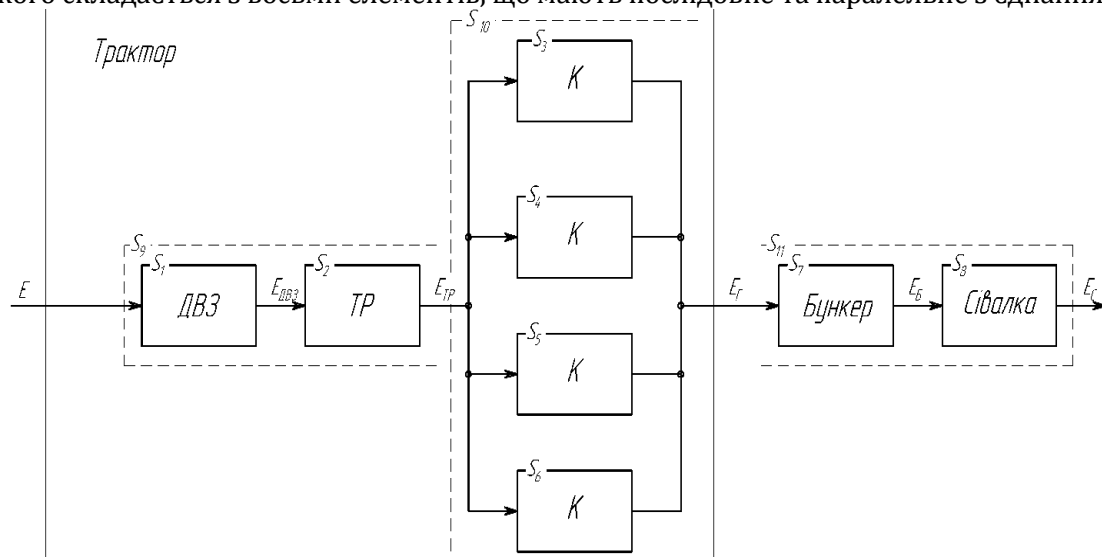


Рис. 4. Структурна схема енергетично-динамічної моделі БТТМ: ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння; ТР – трансмісія; К – колеса; E – енергетичні витрати агрегату; ЕДВЗ – енергія, що знімається з маховика ДВЗ; ЕТР – енергія, що передається трансмісією на колеса; ЕГ – енергія на гаку трактора; ЕБ – енергія, що передається бункером на сівалку; ЕС – енергія, що витрачається сівалкою; Si – енергетично-динамічні моделі елементів агрегату

Трактор, сівалка та бункер мають послідовне з'єднання (рис. 4). Колеса трактора передають енергію від трансмісії трактора до його остову паралельно.

Для зручності формування рівнянь об'єднаємо енергетично-динамічні моделі ДВЗ (S_1) і ТР (S_2) й позначимо цю систему S_9 . Рівняння стану та виходу для системи S_9 мають вигляд:

$$d \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & 0 \\ B_2 \cdot C_1 & A_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \cdot D_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix}; \quad (9)$$

$$Y_{S_9} = \begin{pmatrix} D_2 \cdot C_1 & C_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D_1 & D_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$\text{де } U_1 = E; U_2 = [E_{\text{ДВЗ}} \quad i]^T; Y_{S_9} = E_{\text{ТР}}.$$

Наступним кроком розглянемо ЕДМ коліс трактора з паралельним з'єднанням. Рівняння стану та виходу для системи S_{10} мають вигляд:

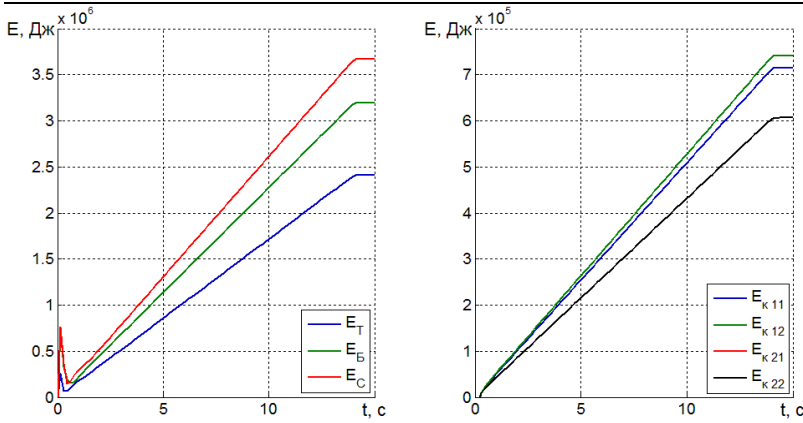


Рис. 5. Залежність енергетичних витрат БТТМ від часу під час розгону: E_T, E_B, E_C – енергетичні витрати, відповідно, трактора, бункера та сівалки; $E_{k11}, E_{k12}, E_{k21}, E_{k22}$ – енергетичні витрати на колесах трактора

$$\text{де } U_7 = E_T; U_8 = E_B; Y_{S_{11}} = E_C.$$

Тепер розглянемо ЕДМ S_9 – (8), (9), S_{10} – (11), (12) та S_{11} – (13) – (14) як послідовне з'єднання трьох моделей. Рівняння стану будуть таким:

$$d \begin{pmatrix} X_9 \\ X_{10} \\ X_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_9 & 0 & 0 \\ B_{10} \cdot C_9 & A_{10} & 0 \\ 0 & B_{11} \cdot C_{10} & A_{11} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_9 \\ X_{10} \\ X_{11} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_7 \\ B_8 \cdot D_7 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_9 \\ U_{10} \\ U_{11} \end{pmatrix}, \quad (15)$$

а виходу:

$$Y_{S_{12}} = (D_{11} \cdot C_{10} \quad D_{10} \cdot C_9 \quad D_8) \cdot \begin{pmatrix} X_9 \\ X_{10} \\ X_{11} \end{pmatrix} + (D_9 \quad D_{10} \quad D_{11}) \cdot \begin{pmatrix} U_9 \\ U_{10} \\ U_{11} \end{pmatrix}, \quad (16)$$

$$\text{де } U_9 = E; U_{10} = E_{TP}; U_{11} = E_T; Y_{S_{12}} = E_C.$$

Енергетичні витрати БТТМ під час розгону наведено на рис. 5.

Найбільша енергія витрачається сівалкою $E_C = 3,75 \cdot 10^6$ Дж після закінчення розгону агрегату, тобто за $t \geq 14$ с (рис. 5). Найменші витрати енергії у трактора – $E_C = 2,4 \cdot 10^6$ Дж. Для руху агрегату передніми колесами трактора витрачається $E_{k11} = 7,1 \cdot 10^5$ Дж і $E_{k12} = 7,45 \cdot 10^5$ Дж; задніми – $E_{k21} = E_{k22} = 6,1 \cdot 10^5$ Дж. Витрата енергії всіма елементами підвищується лінійно з відповідним підвищенням швидкості руху до робочої – $v = 2,8$ м/с.

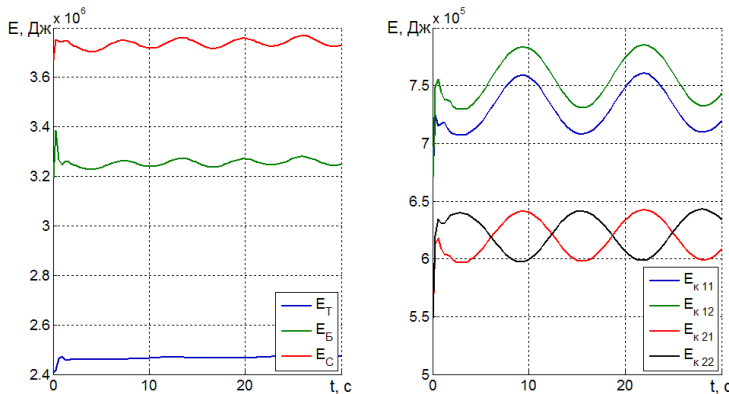


Рис. 6. Залежність енергетичних витрат агрегату від часу під час руху за синусоїдальною траєкторією

Розрахунок енергетичних витрат БТТМ для іншого випадку руху (рух, що наближений до експлуатаційних умов, зі зміною кута повороту керованих коліс трактора за гармонійним законом) наведений на рис. 6. Енергетичні витрати елементами БТТМ змінюються за гармонійним законом з періодом $T = 7,5$ с і перехідним процесом на початку руху за $0 < t < 1,5$ с (рис. 6). Найбільші витрати енергії відбуваються в сівалці $E_C = 3,7 \cdot 10^6$ Дж з розмахом $\Delta E_C = 0,15 \cdot 10^6$ Дж. Енергетичні витрати трактора та бункера дорівнюють $E_T = 2,5 \cdot 10^6$ Дж і $E_B = 3,25 \cdot 10^6$ Дж з розмахом $\Delta E_T = 0,1 \cdot 10^6$ Дж і $\Delta E_B = 0,15 \cdot 10^6$ Дж. Енергетичні витрати на колесах трактора (рис. 6) мають такі особливості. Коливання енергетичних витрат на передніх колесах перебувають в однаковій фазі, а задніх – у протифазі та складають $E_{k11} = 7,25 \cdot 10^5$ Дж з розмахом $\Delta E_{k11} = 0,5 \cdot 10^5$ Дж – для переднього лівого колеса; $E_{k12} = 7,55 \cdot 10^5$ Дж з розмахом $\Delta E_{k12} = 0,5 \cdot 10^5$ Дж – переднього правого; $E_{k21} = E_{k22} = 6,25 \cdot 10^5$ Дж з розмахом $\Delta E_{k21} = \Delta E_{k22} = 0,4 \cdot 10^5$ Дж – для задніх коліс. Встановлено, що різниця між даними, що отримані під час експериментальних досліджень, і теоретичними даними складає не більше ніж 4%. Дані теоретичних

$$\begin{cases} \dot{X}_3 = A_3 \cdot X_3 + B_3 \cdot U_3; \\ \dot{X}_4 = A_4 \cdot X_4 + B_4 \cdot U_4; \\ \dot{X}_5 = A_5 \cdot X_5 + B_5 \cdot U_5; \\ \dot{X}_6 = A_6 \cdot X_6 + B_6 \cdot U_6; \end{cases} \quad (11)$$

$$Y_{10} = \sum_{i=3}^6 (C_i \cdot X_i + D_i \cdot U_i), \quad (12)$$

де $U_3 = U_4 = U_5 = U_6 = E_{TP}; Y_{10} = E_T$.

ЕДМ сівалки S_8 і бункера S_9 з'єднуються послідовно та утворюють систему S_{11} , рівняння стану та виходу мають вигляд:

$$d \begin{pmatrix} X_7 \\ X_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_7 & 0 \\ B_8 \cdot C_7 & A_8 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_7 \\ X_8 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_7 \\ B_8 \cdot D_7 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_7 \\ U_8 \end{pmatrix}; \quad (13)$$

$$Y_{S_{11}} = (D_8 \cdot C_7 \quad C_8) \cdot \begin{pmatrix} X_7 \\ X_8 \end{pmatrix} + (D_7 \quad D_8) \cdot \begin{pmatrix} U_7 \\ U_8 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

досліджень мають менший розмах коливань. Ураховуючи наведені вище результати експериментальних і відповідних теоретичних досліджень, енергетично-динамічну модель БТТМ у складі John Deere 8345R, John Deere 1910 та John Deere 1895 потрібно вважати адекватною.

Висновки та перспективи подальших розвідок

Запропонований метод визначення енергетичних витрат дозволяє оцінити витрати енергії машиною загалом або її елементами. Встановлено, що математичні моделі елементів і машини загалом є суттєво нелінійними. Для більшості нелінійних динамічних об'єктів можна використати методи лінеаризації та надалі досліджувати їх як лінійні. Елементи БТТМ під час аналізу енергетичних витрат становлять собою енергетично-динамічні моделі у вигляді рівнянь простору стану, що дозволяє гнучке формування систем рівнянь при зміні складу та послідовності елементів багатоелементної досліджуваної машини. Складена енергетично-динамічна модель багатоелементного БТТМ на прикладі трактора John Deere 8345R, бункера для посівного матеріалу John Deere 1910 та сівалки прямої сівби John Deere 1895 дозволила визначити енергетичні витрати. Встановлено, що енергетичні витрати елементами БТТМ змінюються за гармонійним законом з періодом $T = 7,5$ с і перехідним процесом на початку руху за $0 < t < 1,5$ с. Найбільші витрати енергії відбуваються в сівалці $E_C = 3,7 \cdot 10^6$ Дж з розмахом $\Delta E_C = 0,15 \cdot 10^6$ Дж. Енергетичні витрати трактора та бункера дорівнюють $E_T = 2,5 \cdot 10^6$ Дж й $E_B = 3,25 \cdot 10^6$ Дж з розмахом $\Delta E_T = 0,1 \cdot 10^6$ Дж та $\Delta E_B = 0,015 \cdot 10^6$ Дж.

Література

1. Антощенко Р.В. Динаміка та енергетика руху багатоелементних машинно-тракторних агрегатів: монографія. Харків: ХНТУСГ, 2017. 244 с.
2. Kondratiev A. Improving the mass efficiency of a composite launch vehicle head fairing with a sandwich structure. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 6. No. 7 (102). P. 6-18.
3. Voloshina A., Panchenko A., Panchenko I., Titova O., Caldare A., Ivanov V. Design of Hydraulic Mechatronic Systems with Specified Output Characteristics. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*. 2020. Vol. 2. P. 42-51.
4. Galych I., Antoshchenkov R., Antoshchenkov V., Lukjanov I., Diundik S., Kis O. Estimating the dynamics of a machine-tractor assembly considering the effect of the supporting surface profile. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 1. № 7 (109). P. 51-62.
5. Panchenko A., Voloshina A., Luzan P., Panchenko I., Volkov S. Kinematics of motion of rotors of an orbital hydraulic machine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1021. P. 12-45.
6. Пастухов В.І. Проблема енергозатрат у рослинництві: закономірність і рентабельність. *Вісн. Полтав. держ. аграр. акад.*, 2006. № 4. С. 79-82.
7. Gerrior S., Juan W., Peter B. An Easy Approach to Calculating Estimated Energy Requirements. *Preventing Chronic Disease*. 2006. № 3(4). P. 172-179.
8. Horrein L., Bouscayrol A., El-Fassi M. Thermal energetic model of an Internal Combustion Engine for simulation of a thermal vehicle. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Seoul*. 2012. P. 978-983.
9. Bulgakov V., Ivanovs S., Adamchuk V., Antoshchenkov R. Investigations of the Dynamics of a Four-Element Machine-and-Tractor Aggregate. *Acta Technologica Agriculturae*, 2019. Vol. 22. №. 4. P. 146-151.

References

1. Antoschenkov, R.V. (2017). *Dynamika ta enerhetyka rukhu bahatoelementnykh mashynno-traktornykh ahrehativ*. [Dynamics and energetics of the movement of multi-element machine-tractor units]. KhNTUSH. Kharkiv.
2. Kondratiev, A. (2019). «Improving the mass efficiency of a composite launch vehicle head fairing with a sandwich structure». *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 6. No. 7 (102). pp. 6-18.
3. Voloshina, A., Panchenko, A., Panchenko, I., Titova, O., Caldare, A., Ivanov, V. (2020). «Design of Hydraulic Mechatronic Systems with Specified Output Characteristics». *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*. Vol. 2. pp. 42-51.
4. Galych, I., Antoshchenkov, R., Antoshchenkov, V., Lukjanov, I., Diundik, S., Kis, O. (2021). «Estimating the dynamics of a machine-tractor assembly considering the effect of the supporting surface profile». *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 1. № 7 (109). pp. 51-62.
5. Panchenko, A., Voloshina, A., Luzan, P., Panchenko, I., Volkov, S. (2021). «Kinematics of motion of rotors of an orbital hydraulic machine». *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1021. pp. 12-45.
6. Pastukhov, V.I. (2006). «The problem of energy consumption in crop production: regularity and profitability». *Visn. Poltav. derzh. ahrar. akad.* № 4. pp. 79-82.
7. Gerrior, S., Juan, W., Peter, B. (2006). «An Easy Approach to Calculating Estimated Energy Requirements». *Preventing Chronic Disease*. № 3(4). pp. 172-179.
8. Horrein, L., Bouscayrol, A., El-Fassi, M. (2012). «Thermal energetic model of an Internal Combustion Engine for simulation of a thermal vehicle». *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Seoul*. pp. 978-983.
9. Bulgakov, V., Ivanovs, S., Adamchuk, V., Antoshchenkov, R. (2019). «Investigations of the Dynamics of a Four-Element Machine-and-Tractor Aggregate». *Acta Technologica Agriculturae*, Vol. 22. №. 4. pp. 146-151.

Стаття надійшла до редакції 26.11.2022 р.