

**ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ АГРЕГАТІВ ЗМІННОЇ МАСИ  
ПРИ ВИКОНАННІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ РОСЛИНИЦТВА****Шуляк Михайло Леонідович**доктор технічних наук, професор  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0000-0001-7286-6602  
m.l.shulyak@gmail.com**Лебедєв Анатолій Тихонович**доктор технічних наук, професор,  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0000-0002-1975-3323  
tiaxntusg@gmail.com**Рапута Вадим Валерійович**аспірант  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0000-0003-1016-1601  
V.Raputa89@gmail.com**Мурчич Максим Миколайович**аспірант  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0009-0002-2824-152X  
murchych@gmail.com

*В статті розглядаються проблеми енергозбереження транспортних та транспортно-технологічних агрегатів. Для транспортно-технологічних агрегатів виконання технологічної операції пов'язано з більш складними динамічними процесами, оскільки потужність двигуна витрачається на транспортну і технологічну частини. Особливо складним з позиції дослідження є рух комбінованих агрегатів змінної маси, таких як посівні комплекси або комплекси для внесення в ґрунт мінеральних добрив та засобів захисту рослин.*

*В роботі визначені умови енергозбереження для транспортно-технологічного агрегату під час виконання технологічної операції за критеріями максимального пришвидшення, швидкості та завантаження двигуна. Мінімум витрати палива можливо досягти при русі транспортно-технологічного агрегату без коливань швидкості. Під час роботи транспортно-технологічного агрегату досягти режиму постійної швидкості або відсутності пришвидшення (сталій рух) неможливо внаслідок нерівності тягового зусилля трактора і опору руху. Тобто в реальній експлікації, навіть при сталому режимі руху відхилення дійсної швидкості  $v_a$ . Для моніторингу динамічних параметрів транспортно-технологічних агрегатів запропоновано використовувати комплекс, що дозволяє з високою точністю досліджувати зміни параметрів роботи агрегату та обирати режими його функціонування.*

*При аналізі пришвидшення (сповільнення) агрегату в трьох площинах (поздовжній, поперечній та вертикальній) за відправну точку береться умова сталого руху – відсутність пришвидшень або сповільнень. Досягти цього режиму руху майже неможливо, проте мінімальні додаткові витрати енергії відповідають режиму з найменшим розмахом коливання.*

*При зміні зовнішніх чинників, з позиції роботи двигуна, можуть виникнути три можливі режими: недовантаження, перевантаження та номінальний режим. За характером зміни вектору повного пришвидшення (сповільнення), його величини і напрямку можна характеризувати режим роботи агрегату.*

*Запропонована методика динамічного аналізу, яка використовує геометричну інтерпретацію процесу руху транспортно-технологічних агрегатів, та дозволяє обирати режими їх роботи за найменшими додатковими витратами енергії. Характеризувати обраний режим можна питомою вагою ядра еліпсоїда, яку можна визначити за результатними статистичної обробки результатів дослідження коливань пришвидшення (сповільнення) агрегату.*

*Визначено, що одним з актуальних напрямків покращення енергозбереження транспортно-технологічних агрегатів може бути активізація мостів причепу або напівпричепу, такий підхід дозволить використати значно більшу частину ваги вантажу при формуванні зчіпної ваги агрегату і, як наслідок, покращить паливну економічність трактора.*

**Ключові слова:** транспортно-технологічний агрегат, режими роботи, енергозбереження, динамічні параметри, діагностичний комплекс.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.4.12>

**Вступ.** В процесі роботи тракторного агрегату при виконанні технологічної операції витрачається велика кількість енергії, тому багато наукових досліджень спрямовані на вивчення питань енергозбереження таких агрегатів, зокрема, робиться акцент саме на питанні динаміки трактору (Kalchenko et al., 2021). Але виникає складність моделювання стохастичних впливів з боку сільськогосподарської машини. Тому вирішення наукової проблеми енергозбереження можливо лише з врахуванням динамічних складових руху агрегату, оскільки саме зменшення динамічних втрат відкриває можливості до подальшого покращення паливної-економічності та якості виконання технологічних операцій (Artomov, 2010; Artomov et al., 2022).

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.

Особливо складним з позиції дослідження виглядає рух комбінованих агрегатів змінної маси, таких як посівні комплекси або комплекси для внесення в ґрунт мінеральних добрив та засобів захисту рослин. В роботах (Antoshchenkov, 2017; Diundyk S.M. et al., 2018) вирішено багато наукових питань щодо динаміки руху та енергозбереження комбінованих посівних агрегатів, проте проблемі зміни маси вантажу в бункері сільськогосподарської машини достатньо уваги не приділено. В роботі (Kozhushko, 2021) розглянута проблема впливу коливань маси рідких вантажів на динаміку руху агрегату, але не розглянуті питання енергозбереження та енергоефективних режимів руху. В роботах (Kalinin, 2018, 2020) розглядається вплив зміни маси на динаміку руху агрегату, проте акцентується увага на питаннях надійності таких агрегатів, питанням енергозбереження чи компонування приділено недостатньо уваги. В роботі (Lebedev et al., 2018) динаміку роботи транспортних та транспортно-технологічних агрегатів рекомендується проводити з використанням експериментальних даних, які характеризують рух агрегату в тривимірному просторі.

**Основна частина.** Робота трактора в складі транспортно-технологічного агрегату пов'язана з витратами енергії, суттєво, більшими ніж на транспортній операції, оскільки крім транспортування вантажу, енергія витрачається на виконання технологічної частини операції (розкидання добрив, обробка ґрунту тощо). Тому при виконанні транспортно-технологічної операції енергія витрачається на транспортну частину з властивими їй динамічними процесами та на привід робочих органів машини через вал відбору потужності. Для цього випадку рівняння руху транспортно-технологічного агрегату представимо у наступному виді:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{m_{TA}}{2} v^2 \right) + R_c v = \eta_m N_e - \frac{N_{PTO}}{\eta_{PTO}}, \quad (1)$$

де  $m_{TA}$  – маса транспортно-технологічного агрегату, кг;  $v$  – швидкість руху, м/с;  $R_c$  – сила опору, Н;  $\eta_m$  – тяговий ККД трактора;  $N_e$  – номінальна потужність двигуна,

кВт;  $N_{PTO}$  – потужність через ВВП, кВт;  $\eta_{PTO}$  – механічний ККД передачі від двигуна до ВВП.

Енергія, яка витрачається на привід робочих органів машини через вал відбору потужності, таких як розкидач добрив, чи перевантажувач, у багатьох дослідженнях приймається, як постійна (динамічною складовою нехтують), тому основні динамічні коливання характеризує саме рух агрегату. Якщо розглянути ліву частину рівня (1), енергія яка витрачена на рух агрегату буде мати дві складові. В рівнянні несталий режим руху агрегату (розгін, сповільнення, повороти і т.д.) буде характеризувати перша складова, а друга буде характеризувати сталий рух, що визначається силою опору руху при певній швидкості та масі агрегату. Причому, зміна маси вантажу буде впливати на обидві складові і без врахування динаміки її зміни обирати режими роботи, чи компонування агрегату недоцільно.

Маса можна представити наступним чином:

$$m_{TA} = m_T + m_{MK} + \frac{dm_e}{dt}, \quad (2)$$

де  $m_T$  – маса трактору, кг;  $m_{MK}$  – конструкційна маса сільськогосподарської машини, кг;  $m_e$  – маса вантажу, що перевозиться, кг.

З достатнім ступенем наближення можна прийняти, що для визначеної швидкості транспортно-технологічного агрегату,  $R_c$  залежна від самого технологічного процесу, властивостей агрофону, тощо та квадратично залежна, наприклад, від швидкості руху, внаслідок аеродинамічного опору (Shuliak et al., 2017):

$$R_c = R_c(s) + \kappa v + \kappa_1 v^2, \quad (3)$$

де  $s$  – поточне значення пройденого шляху ( $ds/dt = v$ );  $R_c(s)$  – складова сили опору руху, що не залежить від швидкості агрегату і є функцією від  $s$ ;  $\kappa, \kappa_1$  – постійні коефіцієнти.

Так як кожному моменту часу буде відповідати визначене значення  $m_e$ , і цей параметр може бути представлений, як функція часу чи пройденого шляху, можна визначити умову сталого руху для окремого випадку.

Тоді рівняння (1) у функції  $s$  з врахуванням (3) у відносних одиницях записується в безрозмірному вигляді:

$$s'' s' + r_c(s) s' + \kappa s'^2 + \kappa_1 s'^3 = \eta_m P, \quad (4)$$

де  $s'', s'$  – швидкості і пришвидшення (сповільнення) агрегату на певній ділянці дороги;  $r_c$  – опір руху;  $P$  – потужність двигуна з врахуванням частини, що передається через ВВП.

При допущенні, що витрата палива  $q$  двигуном є лінійною функцією потужності, справедливо:

$$q = p + a, \quad (5)$$

де:  $a$  – постійна величина.

При проходженні транспортно-технологічним агрегатом ділянки  $s$  за час  $T$  витрата палива тракторним двигуном дорівнює інтегралу:

$$G = \int_0^m q dt = \frac{1}{\eta} \int_0^m (s'' s' + r_c(s) s' + \kappa s'^2 + \kappa_1 s'^3) dt + \int_0^m a dt. \quad (6)$$

Для визначення оптимального закону управління транспортно-технологічним агрегатом для забезпечення мінімуму витрати палива, достатньо знайти функцію  $s(t)$ , що доставляє мінімум функціоналу:

$$I = \int_0^m [\ell'' \ell' + r_c(\ell) \ell' + \kappa \ell'^2 + \kappa_2 \ell'^3] dt \quad (7)$$

Функція  $s(t)$  повинна задовольняти наступним обмеженням:

- $s'' \leq s''_{\max}$  – по максимальному пришвидженню транспортно-технологічного агрегату, що показує умови роботи і режими навантаження;
- $s' \leq s'_{\max}$  – по максимуму швидкості, зумовлене технологічними обмеженнями і умовами безпеки;
- $p \leq p_{\max}$  – по двигуну, що враховує можливе його перевантаження.

Подібні завдання вирішуються варіаційними методами, для функціонала (7) визначаються рівняння екстремалей з рівняння Ейлера-Пуассона:

$$s''(2\kappa + 6\kappa_1 s') = 0 \quad (8)$$

Дане рівняння розпадається на два рівняння  $s'' = 0$  і  $2\kappa + 6\kappa_1 s' = 0$ , вирішенням цих рівнянь є постійна швидкість руху агрегату.

Тобто мінімум витрати палива можливо досягти при русі транспортно-технологічного агрегату без коливань швидкості. Цей висновок справедливий для будь-якого значення сили опору руху  $r_c$ , якому відповідає поточне значення пройденого шляху, члени, що містять функцію  $r_c$  в рівнянні Ейлера-Пуассона скорочуються.

Під час роботи транспортно-технологічного агрегату досягти режиму постійної швидкості або відсутності пришвидшення (сталий рух) неможливо внаслідок нерівності тягового зусилля трактора і опору руху. Тобто в реальній експлікації, навіть при сталому режимі руху відхилення дійсної швидкості  $v_d$  знаходиться в межах  $\pm 2,0\%$  від середнього значення. Коливання швидкості збільшуються при перевезенні сипких матеріалів (мінеральні добрива, зерно, рідких органічних добрив і т.д.).

Перевезення таких вантажів додатково пов'язано з перерозподілом вантажу в кузові причепа або рідини в ємності, що призводить до дестабілізації центру мас

$M$  агрегату, і, як наслідок, додатковим коливанням швидкості руху і пришвидшення.

Представити такий квазістатичний рух можна порівнявши коливання тягової сили  $F_k$  (розрахункове значення, що враховує внутрішні коливання крутного моменту та динаміку взаємодії рушія з опорною поверхнею) та сили опору руху  $R_c$  (значення отримані експериментальним шляхом) рис. 1.

Величини максимальної та мінімальної швидкості руху агрегату можна визначити з рівнянь:

$$v_{d \max} = \bar{v}_d \left(1 + \frac{\delta}{2}\right), \quad v_{d \min} = \bar{v}_d \left(1 - \frac{\delta}{2}\right) \quad (9)$$

де  $\bar{v}_d$  – середнє значення дійсної швидкості, м/с;  $\delta$  – коефіцієнт нерівномірності.

Таким чином, при квазістатичному русі транспортно-технологічного агрегату забезпечити режим  $v_d = const$  неможливо, оскільки є неспівпадіння коливань тягової сили  $F_k$  і опору руху  $R_c$ , як по амплітуді так, і по фазі. Відповідне коливання швидкості призводить до додаткових витрат енергії та зниженню паливної економічності.

Умова руху трактора з постійною швидкістю можна реалізувати при застосуванні багаторівневих двигунів (двигунів постійної потужності, для яких характерний високий коефіцієнт запасу крутного моменту (відношення максимального моменту двигуна до номінального)). Проте виникає проблема швидкодії системи управління роботою двигуна, оскільки, навіть при застосуванні електронної системи управління подачею палива, залишається питання інертності системи двигун–трансмсія. Ще однією суттєвою перешкодою є отримання інформації щодо коливань швидкості, так у сучасних системах точного землеробства ця інформація збирається в функції траєкторії, яку проходить агрегат. У результаті роботи цих систем є постійна затримка в корегуванні режиму роботи двигуна по відношенню до коливань зовнішніх сил.

Одним з рішень оговореної проблеми є визначення впливу коливань оговорених сил на формування дійсної швидкості, в кожен момент часу, завдяки аналізу пришвидшення (сповільнення) агрегату (Lebedev et al., 2013). Але встановлення амплітуди та частоти коливання досить складна задача, бо процес руху агрегату формується

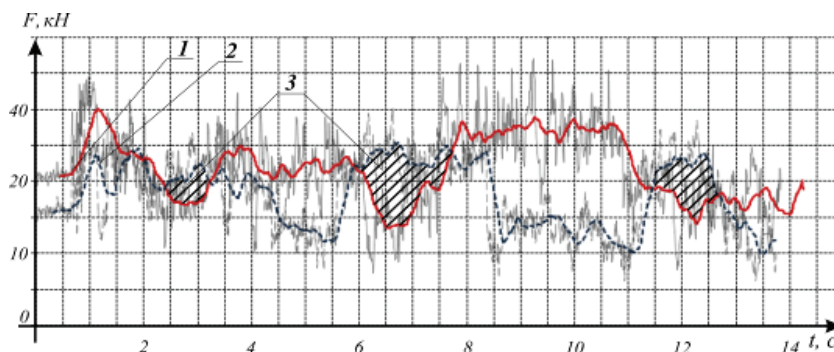


Рис. 1. Коливання тягової сили та сили опору руху

Примітки: 1) тягова сила трактора  $F_k$ ; 2) сили опору руху  $R_c$  та 3) області сповільнення агрегату. Це області, в яких значення  $R_c$  більше ніж  $F_k$  і агрегат знижує дійсну швидкість, при протилежному відбувається пришвидшення.

багатьма стохастичними факторами, тому для моніторингу доцільно використовувати датчики пришвидшення, встановлені на транспортно-технологічний агрегат.

Для отримання відповідної інформації можна використати датчики пришвидшення та телематичну систему трактора, або за її відсутності діагностичний комплекс моніторингу динамічних параметрів тягово-транспортних засобів, описаний в роботі (Shuliak et al., 2017) рис. 2.

Для дослідження силових динамічних параметрів використовується інерційні датчики пришвидшення (акселерометри MMA 7260QT) 30 (ДП). Отримані дані конвертуються 10 (КН) та підсилюються 11 (П) за допомогою генератора частоти 8 (ГЧ) та тактового генератора 9 (ТГ). Датчик має можливість вибору режиму чутливості 28 (РЖЧ) та реєстраційний пристрій 14 (РПП). Передбачена система само-тестування та корекції положення 29 (ЛБ-EEPROM). Візуальне представлення інформації відбувається у програмі «Vehicle dynamics v. 3.9.2» 20 (VD) на планшеті 19 (ІД).

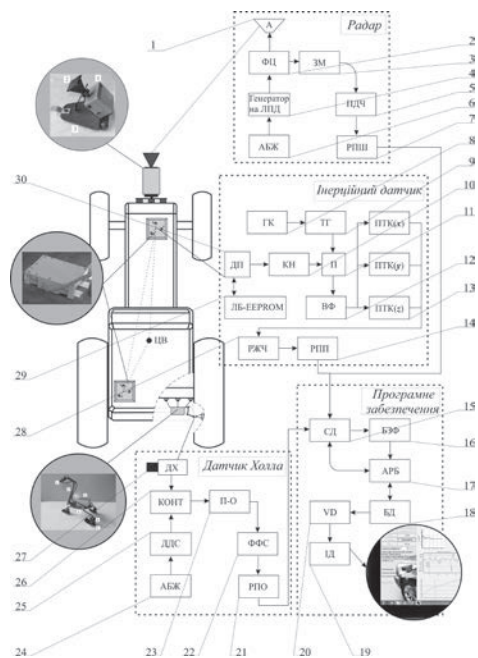


Рис. 2. Діагностичний комплекс моніторингу динамічних параметрів тягово-транспортних засобів

Світовий досвід показує, що для подібних комплексів доцільним є застосування дублюючих систем моніторингу, оскільки кожен датчик має межі точності і похибка при вимірюванні може призвести до помилкового рішення стосовно режиму роботи агрегату. При виборі систем дублювання необхідно пам'ятати, що застосування великої кількості вимірювального обладнання призведе до ускладнення проведення дослідів та знизить їх ефективність, тому необхідно застосовувати необхідний мінімум приладів. Наприклад, для визначення пришвидшення окрім датчика 30 застосувати радар 1 (рис. 2) або дані з систем точного землеробства.

Представлений комплекс моніторингу динамічних параметрів транспортно-технологічних агрегатів дозволяє з високою точністю досліджувати зміни параметрів роботи агрегату та обирати режими його функціонування.

Вибір режиму можна представити на прикладі алгоритму (рис. 3), запропонованому в роботі (Shuliak, 2017).

При використанні алгоритму аналізуються пришвидшення та сповільнення агрегату в трьох площинах (поздовжній, поперечній та вертикальній). За відправну точку береться умова сталого руху – відсутність пришвидшень або сповільнень. Як обговорено вище, досягти цього неможливо, але мінімум додаткових витрат енергії буде відповідати режиму з найменшим розмахом коливань.

**Результати досліджень.** При зміні зовнішніх чинників, з позиції роботи двигуна, можуть виникнути три можливі режими: недовантаження, перевантаження та номінальний режим. За характером зміни вектору повного пришвидшення (сповільнення), його величини і напрямку можна характеризувати режим роботи агрегату. Для цього сукупність точок, що утворені кінцями радіус-вектору відновленого з центру ваги агрегату, можна апроксимувати за допомогою поверхні другого порядку (еліпсоїдом) у відповідності до запропонованої у роботі (Shuliak, 2016) методики. У даному випадку оговорені режими роботи матимуть вигляд геометричної інтерпретації процесу руху агрегату (рис. 4).

При цьому номінальний режим роботи двигуна буде характеризуватися найменшими коливаннями пришвидшення (сповільнення), відповідно цей режим матиме найменші коливання дійсної швидкості. Проте для вирішення задачі енергозбереження транспортно-технологічного

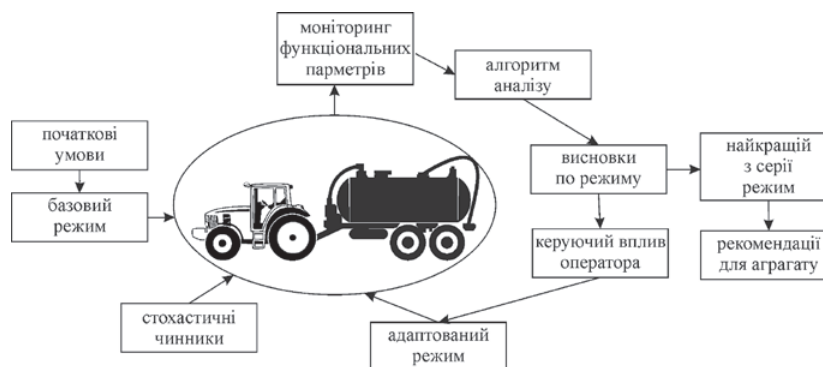
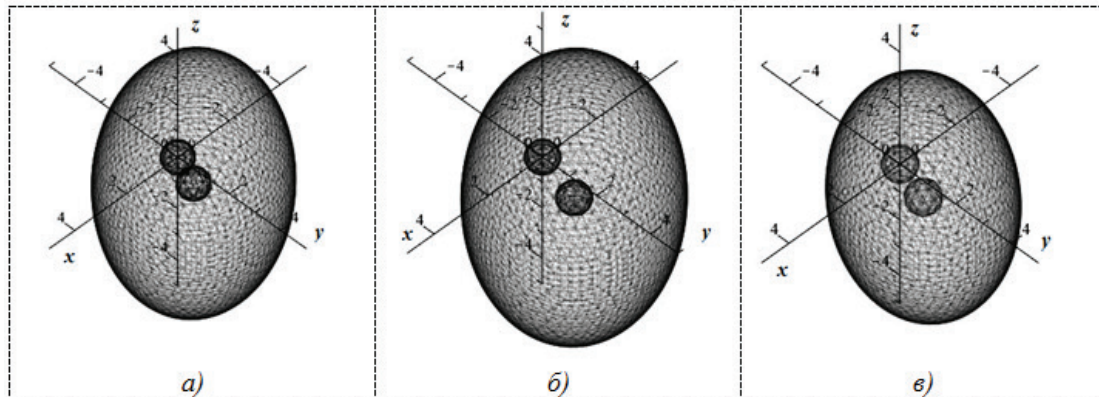


Рис. 3. Алгоритм роботи системи керування режимами роботи

агрегату необхідним є визначення не тільки розмаху коливань пришвидшення (сповільнення), які характеризують зовнішню границю еліпсоїда, а й щільності розподілу точок в його середні.

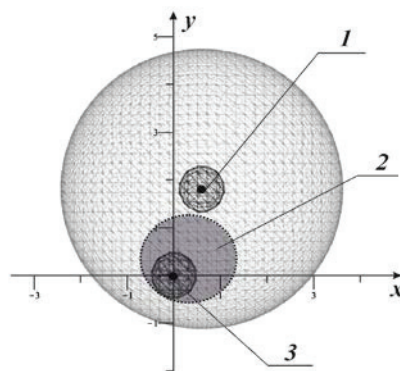
Для характеристики цього розподілу запропоновано представити найбільшу сукупність точок (кінців радіус-вектору), як ядро еліпсоїда рис. 4.

Використовуючи вимоги до якості виконання технологічної операції, встановлюється допустима область функціонування агрегату та визначається положення ідеального ядра еліпсоїда, яке буде характеризувати режим роботи з найменшими витратами енергії (Shuliak, 2017). І далі, при управлінні роботою, обирається режим, максимально наближений до ідеального ядра (рис. 5).



**Рис. 4. Еліпсоїд функціонування тракторного агрегату**

Примітки: а) режим недовантаження двигуна, б) режим перевантаження двигуна, в) номінальний режим



**Рис. 5. Зсув ядра**

Примітки: 1) дійсне ядро, 2) ідеальне ядро, 3) допустима область

При цьому положення ядра, по відношенню до центру еліпсоїда, буде характеризувати відхилення квазістатичного руху від сталого (з постійною швидкістю). Наприклад, зсув ядра по осі ординат (рис. 5) характеризує наявність бічного відведення агрегату, а зсув по осі абсцис – коливання дійсної швидкості (пришвидшення або сповільнення агрегату).

Характеризувати обраний режим можна питомою вагою ядра, яку можна визначити за результатними статистичної обробки результатів дослідження коливань пришвидшення (сповільнення) агрегату:

$$p_r = \frac{n_r}{N},$$

де  $n_r$  – число значень пришвидшення (сповільнення), які потрапляють в середину ядра згідно статистичної обробки;  $N$  – загальна кількість отриманих

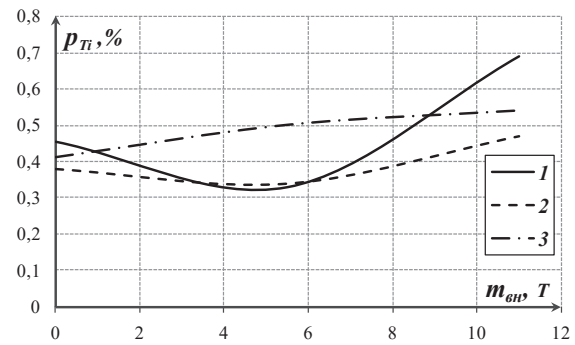
значень (при використанні «Vehicle dynamics v. 3.9.2», ця кількість закладена в програму для усунення впливу людини, тобто завершення циклу фіксації даних відбувається автоматично через кожні 1000 значень).

Експеримент проведений на агрегаті Challenger MT685D + ПБН – 30 (транспортно-перевантажувальна операція) при зміні маси вантажу в причепі (рис. 6, а). Конструктивна маса Challenger MT685D дорівнює 10300 кг, максимальна маса насіння соняшника при повному завантаженні причепа по об'єму дорівнює  $\approx 11000$  кг. Функціональна залежність зміни питомої ваги ядра еліпсоїда від маси вантажу причепа  $p_{Ti} = f(m_e)$  представлена на рис. 6, б.

Обґрунтовано, що раціональному режиму роботи трактора повинні відповідати найменші динамічні втрати агрегату, тобто найбільша питома вага ядра еліпсоїда.



а)



б)

**Рис. 6. Експериментальні дослідження функціональної залежності зміни питомої ваги ядра еліпсоїда від маси вантажу причепу**

Примітки: а) транспортно-технологічний агрегат Challenger MT685D+ ПБН – 30; б) питома вага ядра еліпсоїда, вісі: 1 – поздовжня; 2 – поперечна; 3 – вертикальна.

**Обговорення.** Аналіз результатів (рис. 6, б) показує, що для поперечної та поздовжньої осі наявне зменшення ваги ядра при недовантаженні причепу, а найбільша вага при максимально можливій масі. Загалом можна констатувати, що компоновання агрегату виконано некоректно, оскільки питома вага ядра має низькі значення, навіть, при повному завантаженні кузова, що показує суттєве недовантаження двигуна трактора. Додатково такий висновок підтверджується коефіцієнтом буксування рушіїв (фіксувався комплексом рис. 2 та паралельно телематичною системою трактора), його значення коливалось в межах 3-4%, при допустимих значення для трактору цього тягового класу до 12%. Енергозбереження даного агрегату можна покращити раціональним баластуванням, оскільки наявне надмірне використання баласту. Проте це не вирішить проблему недовантаження, оскільки при транспортуванні соняшнику причеп ПБН-30 не зможе створити достатній тяговий опір для завантаження двигуна трактора Challenger MT685D, тому доцільний перегляд компоновки цього агрегату (необхідно використання трактора з меншою потужністю двигуна). Одним з актуальних напрямків покращення енергозбереження таких агрегатів може бути активізація одного чи всіх мостів причепу або напівпричепу, такий підхід дозволить використати значно більшу частину ваги вантажу, ніж використовується при довантаженні заднього мосту трактора через зчпний пристрій. Але виникає питання в пропорційності розподілу потужності двигуна між мостами агрегату, створення умов руху, при яких причеп не буде набігати на трактор, визначення режимів з найменшими додатковими витратами енергії на динамічні коливання та підвищення коефіцієнту корисної дії трактора в складі агрегату. Окремі рекомендації щодо вирішення наведених проблем наведені в роботі (Lebedev et al., 2024),

де сформульована умова ефективної роботи тягово-приводного агрегату, а також запропонована спрощена методика силового аналізу роботи агрегату на базі експериментальних значень пришвидшень (сповільнень).

Ускладненням застосування наведених методик аналізу для транспортно-технологічних агрегатів є не стаціонарність центру ваги агрегату, через збільшення (зменшення) вантажу. Можливість визначення положення центру ваги агрегату, розглянута в роботі (Lebedev et al., 2023), де запропонована методика, що базується на аналізі експериментальних значень. Проте використання її в динаміці викликає ряд проблем з фільтрацією даних та потребує подальшого вдосконалення.

**Висновки.** За результатами проведених досліджень обґрунтовано методологію оцінки енергозбереження транспортно-технологічних агрегатів змінної маси. Результати досліджень дозволили сформулювати основні теоретичні та науково-практичні висновки.

1. Визначені умови енергозбереження для транспортно-технологічного агрегату при виконанні технологічної операції по максимуму пришвидшення, швидкості та завантаженню двигуна. Мінімум витрати палива можливо досягти при русі транспортно-технологічного агрегату без коливань швидкості.

2. Запропонована методика динамічного аналізу, яка використовує геометричну інтерпретацію процесу руху агрегатів, та дозволяє обирати режими їх роботи за найменшими додатковими витратами енергії.

3. Експериментально підтверджено зв'язок між зміною маси вантажу та динамічними втратами агрегату та визначено, що найкращому режиму роботи транспортно-технологічного агрегату повинна відповідати найбільша питома вага ядра еліпсоїда, яка характеризує мінімум додаткових витрат енергії при коливаннях швидкості.

#### **Бібліографічні посилання:**

1. Antoshchenkov R.V. (2017): *Dynamika ta enerhetyka rukhu bahatoelementnykh mashynno-traktornykh ahreativ. [Dynamics and energetics of motion of multi-element machine-tractor units]: monohrafiia. Kharkiv., Miskdruk. 244 p. [in Ukrainian].*

2. Artomov N., Anikeev A., Kaluzhniy A., Sirovitskiy K., & Kolodiaznyi I. (2022). Investigation of agricultural unit loads in non-established mode of motion when performing technological operations. *Engineering for rural development*. Jelgava, 675-681. DOI: 10.22616/ERDev.2022.21.TF216.
3. Artomov M.P. (2010): Do doslidzhennia dynamiky kolisnoho silskohospodarskoho mashynno-traktornoho ahrehatu [To study the dynamics of a wheeled agricultural machine-tractor unit]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*. Vol. 40(1). P. 151-155. [in Ukrainian].
4. Diundyk S.M., Antoshchenkov R.V., Antoshchenkov V.M. (2018): Do doslidzhennia dynamiky bahatoelementnykh mobilnykh mashyn. [To study the dynamics of multi-element mobile machines]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Natsionalnoi hvardii Ukrainy*. Vol. 1 (31). P. 52–57.
5. Kalchenko B.I., [ta in.] (2021): Dynamika rukhu kolisnykh traktoriv. [Dynamics of wheeled tractors]. *Monohrafiia*. Kharkiv., Miroshnychenko O.A., 320 p. [in Ukrainian].
6. Kalinin Ye.I. (2018): Formuvannia systemnykh vlastyvopei transportno-tekhnologichnykh ahrehativ zminnoi masy. [Formation of system properties of transport and technological units of variable mass]. *Avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.22.20. KhNADU*. Kharkiv, 40 p. [in Ukrainian].
7. Kalinin, Ye. (2020): Analiz dynamiky transportno-tekhnologichnykh ahrehativ yak system zminnoi masy. [Analysis of the dynamics of transport and technological units as variable mass systems]. *Inzheneriia pryrodokorystuvannia* (2(12), P. 38-43. <http://journal.khntusg.com.ua/index.php/enm/article/view/155>.
8. Kozhushko A.P. (2021): Dynamichniy analiz ta metody polipshennia plavnosti khodu kolisnoho traktora pry transportuvanni ridkykh vantazhiv. [Dynamic analysis and methods of improving the smoothness of a wheeled tractor when transporting liquid cargo]. *Avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk. 05.22.02. NTU "KhPI"*. Kharkiv, 44 p. [in Ukrainian].
9. Lebedev A, Shuliak M, Khalin S, Lebedev S, Szwedziak K, Lejman K, Niedbala G, Łusiak T. (2023): Methodology for Assessing Tractor Traction Properties with Instability of Coupling Weight. *Agriculture*. 2023; 13(5):977. <https://doi.org/10.3390/agriculture13050977>
10. Lebedev A.T., Artemov M.P. (2013): Obgruntuvannia efektyvnosti vykorystannia gruntoobrobnykh mashynno-traktornykh ahrehativ modeliuvanniam partsialnykh pryskoren. [Rationalization of the effectiveness of the use of soil tillage machine-tractor units by modeling partial]. *Doslidnitske., Leonid Pogorilyy Ukrainian Scientific Research Institute, Collection of scientific papers*. Vol. 17 (31). p 2. P. 280-293. [in Ukrainian].
11. Lebedev A.T., Lebedev S.A., Korobko A.I. (2018): Kvalimetriia ta metrolohichne zabezpechennia vyprobuvan traktoriv. [Qualimetry and metrological of tractors testing]. *Kharkiv., Miskdruk*. 394 p. [in Ukrainian].
12. Lebedev, A., Shuliak, M., Lebedev, S., Khalin, S., Haidai, T., Kholodov, A., Pirogov, V., & Shaposhnyk, V. (2024): Determining conditions for providing maximum traction efficiency of tractor as part of a soil tillage unit. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2024 (1 (127), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.297902>
13. Shuliak M.L. (2016): Oblast funktsionuvannia mashyno-traktornoho ahrehatu, shcho aproksymovana poverkhneu drugoho poriadku. [The area of operation of a machine-tractor unit, approximated by a second-order surface]. *VNAU. Seriia «Tekhnika enerhetyka transport APK»*. T. 1, Vol. 1(93). P. 28-31. [in Ukrainian].
14. Shuliak M.L. (2017): Eksperymentalne pidtverdzhennia alhorytmu keruvannia rezhymamy roboty transportnoho ahrehatu. [Experimental confirmation of the algorithm for controlling the operating modes of a transport unit]. *LNTU. Seriia «Silskohospodarski mashyny»*. Vol. 36. P. 182-187. [in Ukrainian].
15. Shuliak M.L., Lebediev A.T., Artomov M.P., Maltsev V.P. (2017): Eksperymentalne doslidzhennia alhorytmu keruvannia rezhymamy roboty transportnoho ahrehatu. [Experimental study of the algorithm for controlling the operating modes of a transport unit]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta vviazku*. Vol. 3(43). P. 38-42. [in Ukrainian].

**Shuliak. M. L.**, Doctor of Technical Science, Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

**Lebedev A. T.**, Doctor of Technical Science, Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

**Raputa V. V.**, PhD student, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

**Murchych M. M.**, PhD student, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

### **Energy saving of transport-technological units of variable mass when performing technological operations in crop production**

*The article considers the problems of energy saving of transport and transport-technological units. For transport-technological units, the execution of a technological operation is associated with more complex dynamic processes, since the engine power is spent on the transport and technological parts. The movement of combined units with a variable mass, such as sowing complexes or complexes for applying mineral fertilizers and plant protection products to the soil, is especially complex from the research point of view.*

*The paper defines the conditions for energy saving for a transport-technological unit when performing a technological operation at maximum acceleration, speed and engine load. The minimum fuel consumption can be achieved when the transport-technological unit is moving without speed fluctuations. During the operation of the transport-technological unit, it is impossible to achieve a constant speed or no acceleration (constant movement) due to the inequality of the tractor's traction force and the resistance to movement. That is, in real explication, even with a constant movement mode, the deviation of the actual speed. To monitor the dynamic parameters of transport and technological units, it is proposed to use a complex that allows you to study changes in the unit's operating parameters with high accuracy and select its operating modes.*

*When analyzing the acceleration (deceleration) of the unit in three planes (longitudinal, transverse and vertical), the starting point is the condition of steady motion (absence of accelerations or decelerations). It is almost impossible to achieve this mode of motion, but the minimum additional energy consumption will correspond to the mode with the smallest amplitude of oscillations.*

*When external factors change in the engine's operation, three possible modes may arise: underload, overload and nominal mode. The mode of operation of the unit can be characterized by the nature of the change in the vector of total acceleration (deceleration), its magnitude and direction.*

*A dynamic analysis method is proposed that uses a geometric interpretation of the process of movement of transport and technological units and allows you to select their operating modes with the lowest additional energy consumption. The selected mode can be characterized by the specific gravity of the ellipsoid core, which can be determined by the results of statistical processing of the results of the study of acceleration (deceleration) oscillations of the unit.*

*It has been determined that one of the current directions for improving the energy saving of transport and technological units can be the activation of the axles of the trailer or semi-trailer. This approach will allow using a significantly larger part of the weight of the cargo when forming the coupling weight of the unit and, as a result, will improve the fuel efficiency of the tractor.*

**Key words:** *transport and technological unit, operating modes, energy saving, dynamic parameters, diagnostic complex.*