

*А. П. КОЖУШКО, С. В. НАДТОЧИЙ, С. О. ШУБА, М. Є. ЯКУНІН*

### **ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСМІСІЇ МАШИНИ РОЗМІНУВАННЯ З УРАХУВАННЯМ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

В умовах широкомасштабного мінування територій актуальним є створення ефективних машин розмінування, здатних працювати у складних умовах. Їх надійність, продуктивність і безпечність значною мірою визначаються параметрами силового приводу, зокрема трансмісії, яка забезпечує передачу та перетворення енергії до робочих органів. Специфічні умови експлуатації – слабонесучі ґрунти, перешкоди, змінні та ударні навантаження – вимагають підвищеної адаптивності та енергоефективності трансмісії. Існуючі підходи не повністю враховують ці особливості, що обумовлює необхідність науково обґрунтованих шляхів вибору параметрів машини розмінування. Проведено аналіз сучасного стану розвитку техніки розмінування та розглянуто найбільш поширені й технологічно досконалі машини, що застосовуються у військовій і гуманітарній практиці. Досліджено показники роботи двигуна внутрішнього згоряння Volvo Penta TAD843VE з представленням зовнішньої швидкісної характеристики та характеристики витрати палива. Розроблено кінематичну, структурну та математичну моделі трансмісії машини розмінування, яка враховує опір руйнування та переміщення ґрунту, а також імпульсний ефект від ударів ланцюгів об опорну поверхню. За допомогою моделювання в середовищі Matlab Simulink визначено кінематичні, силові та енергетичні параметри трансмісії при різних режимах роботи технологічного обладнання. Встановлено вплив глибини заглиблення робочого органу на навантаження двигуна та коефіцієнт корисної дії трансмісії. Визначено граничні режими роботи машини та допустимі області функціонування залежно від передавального числа редуктора технологічного обладнання й робочого об'єму гідромоторів. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації машин розмінування з метою підвищення їх енергоефективності та техніко-експлуатаційних показників.

**Ключові слова:** гусенична машина; розмінування; двигун внутрішнього згоряння; трансмісія; гідрооб'ємна передача; моделювання; аналіз

*A. KOZHUSHKO, S. NADTOCHYI, S. SHUBA, M. YAKUNIN*

### **SUBSTANTIATION OF DEMINING MACHINE TRANSMISSION PARAMETERS CONSIDERING OPERATING CONDITIONS**

Under conditions of large-scale landmine contamination, the development of efficient demining machines capable of operating in severe and uncertain environments becomes highly relevant. The reliability, productivity, and operational safety of such machines are largely determined by the parameters of their power drive systems, particularly the transmission, which provides power transfer and energy conversion to the working tools. Specific operating conditions, including weak bearing soils, terrain obstacles, variable resistance forces, and impact loads, require enhanced adaptability and energy efficiency of the transmission system. Existing approaches to transmission parameter selection do not fully consider these operating features, which necessitates the development of scientifically substantiated methods for determining rational parameters of demining machines. The current state of development of demining equipment was analyzed, including the most widespread and technologically advanced machines used in military and humanitarian applications. The operating characteristics of the Volvo Penta TAD843VE internal combustion engine were investigated, including the external speed characteristic and fuel consumption characteristic. Kinematic, structural, and mathematical models of the demining machine transmission were developed. The mathematical model takes into account the resistance forces caused by soil destruction and displacement, as well as the impulse loading generated by chain impacts on the supporting surface during the operation of the working equipment. Using Matlab Simulink simulation tools, the kinematic, power, and energy parameters of the transmission were determined for different operating modes of the technological equipment. The influence of working tool penetration depth on engine load factor and transmission efficiency was established. Limiting operating modes and admissible operating regions depending on the gearbox ratio of the technological equipment and hydraulic motor displacement were determined. The obtained results can be used in the design and modernization of demining machines in order to improve their energy efficiency, operational reliability, and overall technical performance.

**Keywords:** tracked vehicle; demining; internal combustion engine; transmission; hydrostatic transmission; modeling; analysis

**Вступ.** У сучасних умовах України питання гуманітарного розмінування набуло критичного значення у зв'язку з масштабним забрудненням територій вибухонебезпечними предметами внаслідок бойових дій. Значні площі сільськогосподарських угідь, промислових зон, транспортної інфраструктури та лісових масивів потребують системного очищення із застосуванням високопродуктивних і безпечних технічних засобів [1]. У цих умовах ефективність машин розмінування визначається не лише їх продуктивністю, але й здатністю працювати в

складному, неоднорідному та потенційно небезпечному середовищі.

У [2] розглянуто існуючі методи розмінування задля визначення можливості його подальшого вдосконалення. Оприлюднена проблематика гуманітарного розмінування, яка охоплює постраждалі країни, екологічні умови, обмеження існуючих методів, тенденції досліджень у цій галузі та гуманітарні наслідки.

© А. П. Кожушко, С. В. Надточий,  
С. О. Шуба, М. Є. Якунін, 2026

Автори [2] розглянули можливості розробки нових методів розмінування, що інтегруються технологією безпілотних літальних апаратів зі штучним інтелектом. У роботі [3] визначено три важливі можливості застосування дронів у гуманітарній логістиці, тобто транспортування та доставка; геодезична зйомка та моніторинг; комунікація та інтеграція. Оцінювалось гнучкість та оперативність впровадження, зниження витрат, сталий розвиток, а також перешкоди для впровадження технологічної, організаційної та екологічних галузях.

У роботі [4] запропоновано концепцію відкритої роботизованої платформи для гуманітарного розмінування на базі серійних сільськогосподарських мотоблоків. Основними здобутками роботи є зниження вартості та енергоємності машин, впровадження open-source архітектури й модульного принципу побудови. Автори [4] обґрунтували доцільність переходу від важких машин до компактних роботизованих платформ із високою маневреністю, адаптивністю та можливістю використання різних типів робочого обладнання. У роботі [5] також представлено концепцію багатороботизованої системи AIDeDeX для виявлення мін, саморобних вибухових пристроїв та боєприпасів. Основним здобутком роботи є створення гетерогенної системи з безпілотних наземних і повітряних платформ, оснащених комплексом спеціалізованих сенсорів: GPR, EMI, X-Ray backscatter, Raman-спектрометрами та мультиспектральними камерами. Автори [5] запропонували підхід на основі об'єднання сенсорних даних і кооперативної роботи роботів для підвищення точності локалізації вибухонебезпечних об'єктів, а також розглянули перспективи децентралізованого керування за принципами ройової робототехніки.

Незважаючи на високий рівень автоматизації, роботизовані системи розмінування мають низку суттєвих обмежень. Їх ефективність знижується в складних умовах місцевості через обмежену прохідність, залежність від каналів зв'язку та недостатню адаптивність до змінних ґрунтових умов. Крім того, висока вартість, складність технічного обслуговування та потреба у спеціалізованому обладнанні ускладнюють їх масове застосування, особливо в умовах інтенсивного та масштабного розмінування територій.

Сучасні дослідження [6] підтверджують, що роботизовані системи розмінування, попри високий рівень автоматизації, мають обмежену ефективність у складних польових умовах через проблеми прохідності, складність автономної навігації та високу вартість експлуатації. У [6] зазначено необхідність створення спеціалізованих платформ для роботи на складних типах ґрунтів, що свідчить про недостатню універсальність існуючих роботизованих систем.

Також у сучасних робототехнічних дослідженнях підкреслюється, що ефективність

автономних систем суттєво залежить від складності рельєфу, якості сенсорних систем та умов навігації, а практичне застосування таких комплексів супроводжується значними технічними й економічними обмеженнями [7].

Особливості умов експлуатації машин розмінування, зокрема робота на слабонесучих ґрунтах, наявність перешкод, підвищені вимоги до маневреності та точності керування, зумовлюють необхідність удосконалення підходів до проєктування трансмісійних систем [8]. Крім того, вплив змінних навантажень, ударних режимів роботи виконавчих органів та необхідність забезпечення стабільності швидкісних режимів висувають підвищені вимоги до адаптивності та енергоефективності трансмісії.

Проведення системного аналізу конструктивних особливостей сучасних машин розмінування створює підґрунтя для виявлення основних факторів, що визначають режими навантаження трансмісії, а також дозволяє встановити взаємозв'язки між параметрами силового приводу, умовами експлуатації та ефективністю виконання технологічного процесу [9].

Таким чином, існуючі підходи до вибору параметрів трансмісії часто базуються на узагальнених емпіричних залежностях або орієнтовані на традиційні транспортні машини [10], що не повною мірою враховує специфіку роботи машин розмінування. Це зумовлює необхідність розроблення науково обґрунтованих методів визначення раціональних показників трансмісії, які б враховували взаємодію рушіїв із опорною поверхнею, режимні особливості роботи та енергетичні витрати.

*Метою роботи* є наукове обґрунтування показників трансмісії машини розмінування з урахуванням умов її експлуатації та вимог до ефективності функціонування. Для досягнення поставленої мети передбачається вирішення завдань, пов'язаних із аналізом існуючих конструктивних рішень, розробленням математичних моделей функціонування трансмісії, а також визначенням критеріїв оцінювання її ефективності.

**Виклад основного матеріалу.** Сучасний стан розвитку техніки розмінування доцільно конкретизувати шляхом наведення моделей найбільш поширених і технологічно досконалих машин, що застосовуються у військовій та гуманітарній практиці. До сучасних машин розмінування належать: ARMTRAC 400 (Велика Британія), BOZENA 5 (Словаччина), FAE PT-300 (Італія), DOK-ING MV-10 (Хорватія), GCS 200 (Швейцарія та Німеччина), GerminaURCM-3000 (Україна), ГАРТ-5100 (Україна).

Аналіз конструктивних особливостей сучасних машин розмінування, показує, що ключовими тенденціями є: використання дистанційного керування для підвищення безпеки оператора, застосування ланцюгових або фрезерних робочих органів для ефективного руйнування мін, гусеничні шасі для високої

прохідності, модульність конструкції та підвищена вибухостійкість. Ці особливості забезпечують високу продуктивність, надійність і універсальність у різних ґрунтово-кліматичних умовах, а також адаптацію до різних типів місцевості та мінного забруднення.

Дослідження динамічних режимів руху мобільних машин неможливе без адекватного опису процесів, що відбуваються в силовій установці. Саме двигун внутрішнього згоряння визначає характер зміни швидкісних і тягових параметрів машини, особливо в умовах нестационарних режимів, таких як розгін, уповільнення та робота під змінним навантаженням. У зв'язку з цим побудова моделі двигуна є необхідною передумовою для подальшого дослідження динаміки всієї системи.

Існуючі підходи до моделювання роботи двигунів внутрішнього згоряння можна умовно поділити на детерміновані термодинамічні моделі та спрощені інженерні моделі. Перші базуються на описі робочих процесів із використанням ідеалізованих термодинамічних циклів і дозволяють отримати глибоке уявлення про внутрішні процеси в циліндрі. Водночас такі моделі є складними для використання при дослідженні динаміки транспортних засобів. Альтернативою є узагальнені або «усереднені» моделі, які описують взаємозв'язок між основними вхідними та вихідними параметрами двигуна і є більш придатними для задач імітаційного моделювання.

З урахуванням поставлених цілей дослідження доцільно застосувати підхід, що ґрунтується на описі руху колінчастого валу двигуна як основної узагальної координати системи.

Прийнята математична модель орієнтована на відтворення динамічної поведінки двигуна в складі трансмісійної системи та передбачає використання відносних величин, що спрощує її інтеграцію в загальну модель машини. Окреслена модель роботи двигуна ґрунтується на рівнянні, що описує рух колінчастого валу [11, 12] та виглядає наступним чином

$$J \cdot \frac{d\omega_d}{dt} = \left( \mu_{\text{норм}} + \frac{1 - \frac{\omega_d}{\omega_{\text{ном}}}}{k_x - 1} \right) \cdot M_{\text{ном}} - M_e, \quad (1)$$

де  $J$  – приведений до колінчастого валу момент інерції махових мас двигуна внутрішнього згоряння;

$\frac{d\omega_d}{dt}$  – кутове прискорення ланки колінчастого

валу двигуна внутрішнього згоряння;

$\mu_{\text{норм}}$  – нормований крутний момент двигуна внутрішнього згоряння;

$\omega_d$  – кутова швидкість колінчастого валу;

$\omega_{\text{ном}}$  – номінальна кутова швидкість колінчастого валу;

$k_x$  – коефіцієнт, що визначає крутизну регуляторної гілки зовнішньої швидкісної характеристики;

$M_{\text{ном}}$  – номінальний крутний момент на колінчастому валу двигуна;

$M_d$  – момент опору руху.

Подальшим кроком дослідимо роботу двигуна, Volvo Penta TAD843VE 235kW, зовнішня-швидкісна характеристика та характеристика витрати палива представлено на рис. 1 згідно з [13].

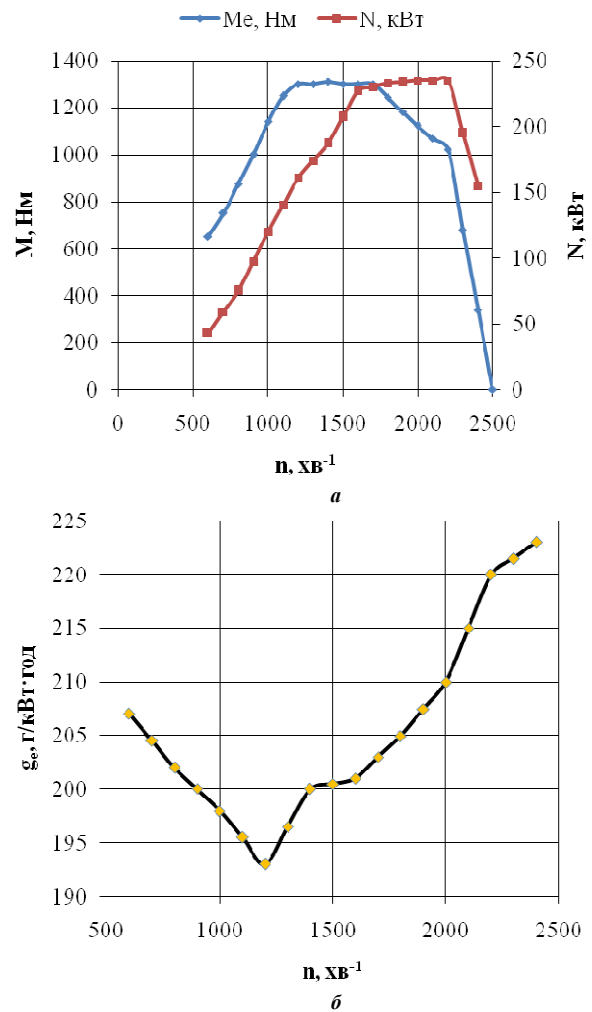


Рисунок 1 – Апроксимовані характеристики двигуна Volvo:

$a$  – зовнішня швидкісна характеристика;

$b$  – характеристики витрати палива

Наступним кроком складемо модель трансмісії. Ефективність функціонування машин розмінування значною мірою визначається параметрами їх трансмісійних систем, які забезпечують передачу енергії від силової установки до рушійних систем та приводу технологічного обладнання. Особливого значення набуває привід робочих органів, оскільки саме він визначає продуктивність, енергетичну ефективність та надійність виконання технологічного процесу розмінування в складних умовах експлуатації.

Сучасні машини розмінування все частіше оснащуються гідрооб'ємними трансмісіями, які у поєднанні з механічними редукторами дозволяють реалізувати широкий діапазон регулювання швидкостей і крутних моментів, забезпечуючи адаптацію до змінних навантажень. Разом із тим, вибір раціональних параметрів такої комбінованої трансмісії є складною науково-технічною задачею, що потребує врахування взаємозв'язку між характеристиками гідромашин, передавальними числами механічних передач і режимами роботи технологічного обладнання.

Одними з ключових параметрів, що визначають роботу гідрооб'ємної передачі, є робочий об'єм гідронасоса та гідромоторів, які безпосередньо впливають на витрату робочої рідини, частоту

обертання та крутний момент на виході системи. У свою чергу, передавальне число циліндричних редукторів визначає узгодження параметрів гідроприводу з вимогами робочого органу. Некоректний вибір цих параметрів може призводити до перевантаження елементів трансмісії, зниження ККД або неефективного використання потужності двигуна.

Аналізуючи складові елементи досліджуваної трансмісії машини розмінування відмітимо, що вона складається з редукторів та гідрооб'ємної передачі, які потребують математичного опису. На основі аналізу структурної схеми (рис. 2) сформуємо кінематичні та силові рівняння трансмісії машини розмінування згідно з [14].

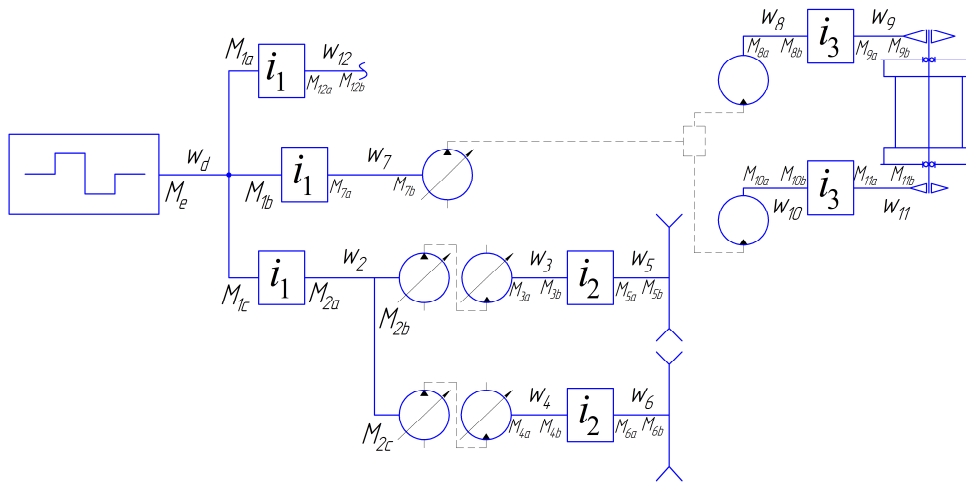


Рисунок 2 – Структурна схема трансмісії машини розмінування

Система рівнянь, що описує кінематичні показники, які протікають у вузлах трансмісії:

$$\begin{cases} \omega_d \cdot i_1 - \omega_{12} = 0; & \omega_d \cdot i_1 - \omega_7 = 0; \\ e_1 \cdot q_1 \cdot \omega_7 - 2 \cdot q_2 \cdot \omega_8 = \lambda \Delta P; \\ \omega_8 \cdot i_3 - \omega_9 = 0; & \omega_d \cdot i_1 - \omega_2 = 0; \\ e_1^1 \cdot q_1^1 \cdot \omega_2 - e_2^1 \cdot q_2^1 \cdot \omega_3 = \lambda^1 \Delta P^1; \\ \omega_3 \cdot i_2 - \omega_5 = 0, \end{cases} \quad (2)$$

де  $\omega_i$  – кутова швидкість ланки, рад/с;

$i_j$  – передатне відношення редуктора;

$e_1$  – відносні параметри регулювання гідронасосу гідрооб'ємної передачі для технологічного обладнання;

$q_1, q_2$  – максимальна продуктивність гідромашин(гідронасоса та гідромотора відповідно), м<sup>3</sup>/рад;

$\lambda$  – коефіцієнт об'ємних втрат, пропорційних перепаду тиску в гідросистемі гідрооб'ємної передачі для технологічного обладнання;

$\Delta P$  – перепад робочого тиску в гідрооб'ємної передачі для технологічного обладнання, МПа;

$e_1^1, e_2^1$  – відносні параметри регулювання гідронасосу та гідромотора, що забезпечує транспортну роботу;

$q_1^1, q_2^1$  – максимальна продуктивність гідромашин(гідронасоса та гідромотора

відповідно), що забезпечує транспортну роботу, м<sup>3</sup>/рад;

$\lambda^1$  – коефіцієнт об'ємних втрат, пропорційних перепаду тиску в гідросистемі гідрооб'ємної передачі, що забезпечує транспортну роботу;

$\Delta P^1$  – перепад робочого тиску в гідрооб'ємної передачі, що забезпечує транспортну роботу, МПа.

Система рівнянь, що описує силові показники, які протікають у вузлах трансмісії:

$$\begin{cases} M_{1a} \cdot \eta^\circ - M_{12a} \cdot i_1 = 0; & M_{1b} \cdot \eta^\circ - M_{7a} \cdot i_1 = 0; \\ M_{7b} - e_1 \cdot q_1 \cdot \Delta P = \Theta \Delta M_1; \\ M_{8a} + 2 \cdot q_2 \cdot \Delta P = \Theta \Delta M_2; \\ M_{8b} \cdot \eta^\circ - M_{9a} \cdot i_3 = 0; & M_{1c} \cdot \eta^\circ - M_{2a} \cdot i_1 = 0; \\ M_{2b} - e_1^1 \cdot q_1^1 \cdot \Delta P^1 = \Theta \Delta M_1^1; \\ M_{3a} + q_2^1 \cdot \Delta P^1 = \Theta \Delta M_2^1; \\ M_{3b} \cdot \eta^\circ - M_{5a} \cdot i_2 = 0; \\ M_{1a} + M_{1b} + M_{1c} + M_e = 0; \\ M_{2a} + M_{2b} = 0; & M_{3a} + M_{3b} = 0; \\ M_{5a} + M_{5b} = 0; & M_{7a} + M_{7b} = 0; \\ M_{8a} + M_{8b} = 0; & M_{9a} + M_{9b} = 0; \\ M_{12a} + M_{12b} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

де  $M_i$  – моменти на вході і виході редукторів, Нм;

$\eta$  – ККД в зубчастих зчепленнях, що визначає втрати моментів;

$\Theta$  – коефіцієнт обліку втрат у зубчастих зчепленнях ( $\Theta = 0$  – без урахування втрат,  $\Theta = -1$  з урахуванням втрат у зубчастих зчепленнях);

$M_1, M_2$  – моменти втрат у гідромашинах, що обчислюються як функції параметрів регулювання  $e$ , кутової швидкості валу гідромашини  $\omega$ , робочого об'єму  $q$  та перепаду тиску  $\Delta P$  [15].

Визначення складових руху технологічного обладнання (барабана з ланцюгами) базується на класичному рівнянні

$$I_{\bar{o}} \cdot \frac{dw_0}{dt} = M_{9b} - M_{onip}, \quad (4)$$

де  $I_{\bar{o}}$  – момент інерції мас барабана, що обертаються;

$m_0$  – маса барабану.

Визначення крутного моменту опору ґрунтується на врахуванні опору руйнування та переміщення ґрунту  $M_{zp}(t)$  та імпульсного моменту від ударів ланцюгів  $M_{y0}(t)$

$$M_{onip} = M_{zp}(t) + M_{y0}(t). \quad (5)$$

Момент  $M_{zp}(t)$  формується внаслідок взаємодії робочих елементів ротора (ланцюгів, ударних елементів) із ґрунтовим середовищем і відображає сукупний опір процесам руйнування, зсуву та переміщення ґрунтової маси. Фізично цей момент є результатом дії розподілених сил опору, що виникають при: пластичному деформуванні та руйнуванні ґрунту (подолання зчеплення та внутрішнього тертя); зсуві ґрунтових шарів уздовж поверхонь ковзання; переміщенні та розкиданні частинок ґрунту робочими елементами; терті ґрунту об елементи робочого органу.

Величина  $M_{zp}(t)$  визначається фізико-механічними властивостями ґрунту (щільність, вологість, кут внутрішнього тертя, зчеплення), геометричними параметрами робочого органу (радіус, ширина захвату, довжина ланцюгів) та режимами роботи (глибина обробки, швидкість обертання ротора, поступальна швидкість машини). За своєю природою  $M_{zp}(t)$  є порівняно повільно змінною (квазістаціонарною) складовою, оскільки зміни визначаються неоднорідністю ґрунту та варіаціями режимів роботи. У часовій області він характеризується згладженим перебігом без різких піків

$$M_{zp}(t) = k_{zp} \cdot b \cdot h(t) \cdot n_l \cdot r_0 \cdot \frac{1}{\eta_{np}}, \quad (6)$$

де  $k_{zp}$  – питомий опір ґрунту;

$b$  – ширина контакту ланцюга;

$h(t)$  – глибина заглиблення;

$n_l$  – кількість ланцюгів, що одночасно взаємодіють з ґрунтом;

$\eta_{np}$  – ККД приводу.

Момент  $M_{y0}(t)$  обумовлений ударною взаємодією ланцюгів робочого органу з

поверхнею ґрунту та перешкодами (камені, тверді включення, вибухонебезпечні предмети). Фізично він виникає внаслідок: різкої зміни імпульсу ланцюга при контакті з перешкодою; перетворення кінетичної енергії ланцюга в роботу руйнування та деформації ґрунту; локальних ударних навантажень, що передаються на ротор і далі на трансмісію. Кожен контакт ланцюга з ґрунтом має короткочасний характер і супроводжується виникненням високоамплітудного імпульсу моменту, тривалість якого значно менша за характерний час зміни  $M_{y0}(t)$ .

Таким чином,  $M_{y0}(t)$  є високочастотною нестационарною складовою, що має імпульсний (переривчастий) характер і визначається: масою та довжиною ланцюгів; кутовою швидкістю ротора (швидкістю удару); жорсткістю контакту «ланцюг – ґрунт»; наявністю твердих включень у ґрунті. У часовій реалізації  $M_{y0}(t)$  проявляється як послідовність окремих піків моменту, накладених на середній рівень навантаження

$$M_{y0}(t) = \frac{m_l \cdot \alpha \cdot w_r \cdot r_r^2}{\Delta t} \cdot \left( \frac{h(t)}{h_0} \right)^{0.7}. \quad (7)$$

де  $m_l$  – приведена маса ланцюга;

$\alpha$  – коефіцієнт втрати швидкості, тобто частка лінійної швидкості кінця ланцюга, що втрачається на удар;

$\omega_r$  – кутова швидкість ротора;

$r_r$  – плече прикладання сили удару, яка перетворює імпульс сили в крутний момент;

$\Delta t$  – тривалість удару.

Сумарний момент опору має комбінований характер – поєднання квазістаціонарної та імпульсної складових, що є принциповою особливістю машин розмінування. Для визначення взаємозв'язків силових та кінематичних параметрів трансмісії створено програмну реалізацію, які розроблена в системі Matlab за допомогою підсистеми моделювання процесів Simulink (рис. 3).

Подальшим кроком необхідно обґрунтувати критерії оцінювання ефективності трансмісії. Як критерії оцінювання впливу параметрів гідрооб'ємно трансмісії доцільно використовувати коефіцієнт використання потужності двигуна та загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) трансмісії. Перший із них характеризує ступінь завантаження силової установки та дозволяє оцінити ефективність її використання в заданих умовах роботи, тоді як другий відображає рівень енергетичних втрат у процесі передачі потужності до робочого органу. Комплексне застосування зазначених критеріїв дає змогу встановити раціональні значення робочого об'єму гідромашин та передавального числа редуктора, що забезпечують одночасно високий рівень використання потужності двигуна та мінімальні втрати енергії в трансмісії.

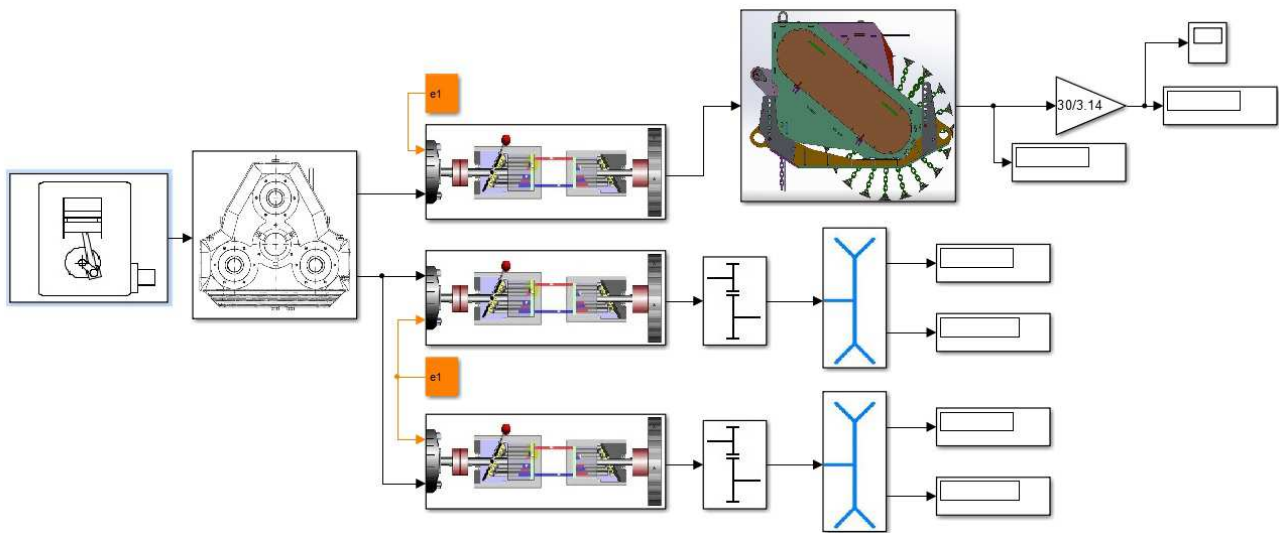


Рисунок 3 – Програмна реалізація для розрахунку кінематичних та силових параметрів реалізована у пакеті програмування MATLAB/SIMULINK

Як критерії оцінювання впливу параметрів гідрооб'ємно трансмісії доцільно використовувати коефіцієнт використання потужності двигуна та загальний ККД трансмісії. Перший із них характеризує ступінь завантаження силової установки та дозволяє оцінити ефективність її використання в заданих умовах роботи, тоді як другий відображає рівень енергетичних втрат у процесі передачі потужності до робочого органу.

Коефіцієнт використання потужності двигуна  $\varepsilon_N$  визначається як відношення ефективної потужності двигуна до номінальної потужності двигуна. При малих значеннях коефіцієнта спостерігається недовантаження двигуна, що супроводжується зниженням його паливної економічності та нераціональним використанням встановленої потужності. Водночас надмірне наближення коефіцієнта до одиниці може призводити до перевантаження двигуна, особливо в умовах імпульсного характеру навантаження, притаманного роботі барабана з ланцюгами. З огляду на це, раціональний діапазон значень коефіцієнта використання потужності двигуна доцільно приймати в межах 0,75–0,9.

ККД трансмісії є інтегральною характеристикою енергетичної ефективності приводу робочого органу та визначає частку потужності двигуна, що безпосередньо використовується для виконання технологічного процесу. Зміна робочого об'єму гідронасоса впливає на ККД гідросистеми через зміну режимів течії робочої рідини, рівня витоків і гідравлічних втрат. Зокрема, при збільшенні витрати можливе зростання втрат на тертя та дроселювання, що призводить до зниження ефективності.

Використання зазначених критеріїв у комплексі дозволяє врахувати як енергетичні можливості силової установки, так і ефективність передачі цієї енергії до робочого органу. Це створює передумови для формування задачі оптимізації параметрів трансмісії, у якій цільова функція може бути сформульована як

забезпечення максимального ККД при обмеженнях на допустимий рівень завантаження двигуна. Такий підхід дозволяє обґрунтувати раціональні значення робочого об'єму гідронасоса та передавального числа редуктора з урахуванням специфіки роботи машини розмінування, зокрема наявності значних змінних та ударних навантажень.

**Обговорення результатів.** На початку виконується моделювання базової машини розмінування з варіацією умов експлуатації. Проаналізуємо рух машини розмінування при заглибленні робочого обладнання на середню глибину  $h_0 = 0,1$  м (рис. 4).

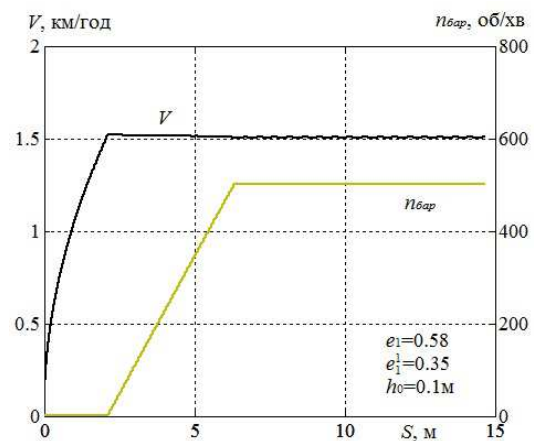


Рисунок 4 – Зміна кінематичних показників машини розмінування при  $h_0 = 0,1$  м

З рис. 4 відмітимо, що швидкість руху машини розмінування, при заглибленні робочого обладнання на середню глибину  $h_0 = 0,1$  м, досягає  $V = 1,5$  км/год. при зміні параметру регулювання  $e_1' = 0,35$ . Також відмітимо, що частота обертання барабана сягає  $n_{\text{обр}} = 500$  об/хв. при зміні параметру регулювання  $e_1 = 0,58$ . При таких умовах коефіцієнт використання потужності

двигуна  $\varepsilon_N = 0,58$ , а ККД трансмісії –  $\eta = 0,6$ . Також відмітимо, що розподіл потужності, який необхідний на рух машини складає 29,5% від потужності двигуна; на додаткове обладнання – 26%, а на технологічне обладнання 44,5%.

При моделюванні руху машини розмінування, при заглибленні робочого обладнання на середню глибину  $h_0 = 0,2$  м, досягання кінематичних показників таких же, як й на рис. 4, відбувається при зміні параметру регулювання  $e_1^1 = 0,35$  ( $V = 1,5$  км/год.) та при зміні параметру регулювання  $e_1 = 0,59$  ( $n_{бар} = 500$  об/хв.). При цьому коефіцієнт використання потужності двигуна  $\varepsilon_N = 0,81$ , а ККД трансмісії –  $\eta = 0,75$ . Розподіл потужності, який необхідний на рух машини складає 19% від потужності двигуна; на додаткове обладнання – 22%, а на технологічне обладнання – 59%. З результатів помітно, що збільшення глибини заглиблення технологічного обладнання суттєво впливає на кінематичні та силові показники.

При моделюванні руху машини розмінування, при заглибленні робочого обладнання на середню глибину  $h_0 = 0,3$  м, досягання кінематичних показників таких же, як й на рис. 4, відбувається при зміні параметру регулювання  $e_1^1 = 0,42$  ( $V = 1,5$  км/год) та при зміні параметру регулювання  $e_1 = 0,66$  ( $n_{бар} = 500$  об/хв.). При цьому коефіцієнт використання потужності двигуна  $\varepsilon_N = 1,1$ , а ККД трансмісії –  $\eta = 0,86$ . Розподіл потужності, який необхідний на рух машини складає 12% від потужності двигуна; на додаткове обладнання – 16%, а на технологічне обладнання – 72%. За величиною показника використання потужності двигуна встановлено, що реалізація середньої глибини заглиблення  $h_0 = 0,3$  м є неприпустимою.

Таким чином, на максимальній величині заглиблення проаналізуємо зміну передавального

числа редуктора  $i_3$  приводу технологічного обладнання з  $i_3 = 1,25$  на  $i_3 = 1$ . Така зміна не дозволяє отримати частоту обертання барабана в  $n_{бар} = 500$  об/хв, а лише 310 об/хв. Тому така модернізація не є доцільною. Проте, якщо змінити передавальне числа редуктора  $i_3$  приводу технологічного обладнання з  $i_3 = 1,25$  на більше – це підвищить частоту обертання барабана в  $n_{бар}$ , але зумовить й збільшення перепаду робочого тиску в гідрооб'ємній передачі.

Збільшення робочих об'ємів гідронасоса та гідромотора створює передумови для переходу гідрооб'ємної передачі від високонапірного до більш об'ємного режиму роботи, що може сприяти зниженню рівня робочого тиску та згладжуванню пікових навантажень. За умови раціонального узгодження з передавальним числом редуктора це дозволяє зменшити споживану потужність і частково розвантажити двигун внутрішнього згорання. Водночас збільшення витрати робочої рідини може призводити до зростання енергетичних втрат і підвищення навантаження на двигун. Таким чином, ефективність застосування гідромашин більшого робочого об'єму визначається співвідношенням між зниженням тиску та зростанням витрати і повинна оцінюватися комплексно з урахуванням параметрів редуктора та режимів роботи технологічного обладнання. Тому доцільним є аналіз зміни об'єму гідромашин та передавального числа редуктора  $i_3$  залежно від зміни коефіцієнт використання потужності двигуна  $\varepsilon_N$ . На рис. 5 показана зміна коефіцієнту використання потужності двигуна  $\varepsilon_N$  та перепаду робочого тиску в приводі технологічного обладнання  $\Delta P$  залежно від передавального числа редуктора  $i_3$  та об'єму гідромотору.

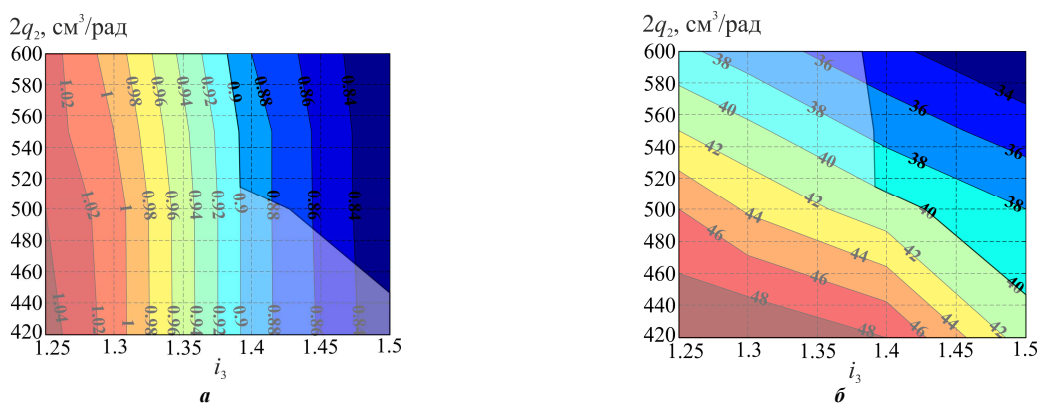


Рисунок 5 – Зміна показників залежно від передавального числа редуктора  $i_3$  та об'єму гідромотору  $2q_2$ :  
а –  $\varepsilon_N$ ; б –  $\Delta P$  (МПа)

На рис. 5 показано допустимі межі функціонування машини розмінування з заглибленням технологічного обладнання на глибину 30 см. Умови функціонування прийняті такі що перепад робочого тиску  $\Delta P$  не повинен перевищувати 40 МПа, а коефіцієнт використання

потужності двигуна  $\varepsilon_N$  не повинен перевищувати позначки в 0,9. Зважаючи на це, на Рис. 5 показано, що при впровадженні редуктора приводу технологічного обладнання  $i_3 = 1,4$  необхідно збільшити об'єми гідромоторів від 260 до 300 см<sup>3</sup> кожного. А при впровадженні

редуктора приводу технологічного обладнання  $i_3 = 1,5$  необхідно збільшити об'єми гідромоторів від 230 до 300 см<sup>3</sup> кожного.

Таким чином, шляхом варіювання робочого об'єму гідромашин та передавального числа редуктора приводу технологічного обладнання визначено раціональні значення енергетичних ( $\epsilon_N$ ), силових ( $\Delta P$ ) та експлуатаційні (швидкісні) показники системи машини розмінування.

**Висновки.** Встановлено, що при заглибленні робочого обладнання на  $h_0 = 0,1$  м забезпечується робочий режим руху машини за помірного навантаження двигуна. Із зростанням глибини до  $h_0 = 0,2$  м досягнення тих самих кінематичних параметрів супроводжується суттєвим підвищенням використання потужності двигуна ( $\epsilon_N = 0,81$ ) та ККД трансмісії ( $\eta = 0,75$ ), а також зміщенням балансу потужності в бік технологічного обладнання. Подальше збільшення глибини до  $h_0 = 0,3$  м призводить до перевантаження двигуна ( $\epsilon_N = 1,1$ ), що свідчить про неприпустимість такого режиму роботи.

У результаті дослідження встановлено, що зменшення передавального числа редуктора приводу технологічного обладнання з  $i_3 = 1,25$  до  $i_3 = 1$  не забезпечує необхідної частоти обертання барабана, що свідчить про недоцільність такої модернізації. Водночас збільшення  $i_3$  дозволяє підвищити частоту обертання барабана, але супроводжується зростанням перепаду робочого тиску в гідрооб'ємній передачі. За результатами параметричного аналізу, з урахуванням обмежень  $\Delta P \leq 40$  МПа та  $\epsilon_N \leq 0,9$ , визначено допустимі області функціонування машини при заглибленні 0,3 м. Зокрема, при  $i_3 = 1,4$  необхідне застосування гідромоторів робочим об'ємом 260–300 см<sup>3</sup>, а при  $i_3 = 1,5$  – 230–300 см<sup>3</sup>.

#### Список літератури

1. Підгородецький М., Ясько В., Каленик М. Обґрунтування вагомості основних параметрів перспективних комплектів інженерної розвідки та розмінування місцевості. *Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія: військові та технічні науки*, 2024. 94(1). С. 165-175. <https://doi.org/10.32453/3.v94i1.1581>
2. Hassan M. I., Ahmat D., Ouya S. Technologies behind the humanitarian demining: a review. *International Conference on Smart Applications, Communications and Networking (SmartNets)*, 2024. pp. 1-7. <https://doi.org/10.1109/SmartNets61466.2024.10577706>
3. Rejeb A., Rejeb K., Simske S.J., Treiblmaier H. Humanitarian Drones: A Review and Research Agenda. *Internet Things*. 2021. 16. 100434. <https://doi.org/10.1016/J.IOT.2021.100434>
4. Sepolina E.E., Parmiggiani A., Canali C., Cannella F. Disarmadillo: an open source, sustainable, robotic platform for humanitarian demining. *ACTA IMEKO*. 2022. [https://doi.org/10.21014/acta\\_imeko.v11i3.1262](https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v11i3.1262)
5. Hasselmann K., Malizia M., Caballero R., Poliso F., Govindaraj S., Stigler J., Ilchenko O., Bajic M., Cubber G.D. A multi-robot system for the detection of explosive devices. *ArXiv*. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.14167>

6. Oladunjoye O., Maffattone Ch., Al-Nawal J., Fasullo S., Greenspan E., Koller J., Nikulin A., de Smet T., Clayton G.M. Omnidirectional All-Terrain Screw-Driven Robot Design. *Modeling, and Application in Humanitarian Demining*, IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55, Is. 27. pp. 7-12. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.480>
7. Li Ch., Lewis K. The Need for and Feasibility of Alternative Ground Robots to Traverse Sandy and Rocky Extraterrestrial Terrain. *Adv. Intell. Syst.* 2022. 2100195. <https://doi.org/10.1002/aisy.202100195>
8. Харченко О., Власенко В., Войновский В., Майданович В. Аналіз сучасних технічних рішень для механізованого розмінування сільськогосподарських угідь в Україні. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільськогосподарства України*. 2025. Т.1. № 36(50), С. 99 – 111. [https://doi.org/10.31473/2305-5987-2025-1-36\(50\)-8](https://doi.org/10.31473/2305-5987-2025-1-36(50)-8)
9. Petrișor S.M., Simion M., Bârsan G., Hancu O. Humanitarian Demining Serial-Tracked Robot: Design and Dynamic Modeling. *Machines*. 2023. 11(5):548. <https://doi.org/10.3390/machines11050548>.
10. Camacho-Sanchez C., Yie-Pinedo R., Galindo G. Humanitarian demining for the clearance of landmine-affected areas. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2023. Vol.88. 101611, <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101611>.
11. Ребров О. Ю., Коробка Т. О., Лахман С. В. Математична модель дизельного двигуна в безрозмірних величинах з урахуванням його навантаження і подачі палива. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Транспортне машинобудування* : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. № 19. С. 31-36.
12. Ребров О. Ю. Вибір параметрів шин сільськогосподарських тракторів : монографія. – Харків : Мірошніченко О. А., 2021. 302 с.
13. Volvo Penta TAD843VE. Технічні характеристики та специфікації [Електронний ресурс]. // LECTURA Specs – Режим доступу: <https://www.lectura-specs.com.ua/ua/model/komponenti/dviguni-volvo-penta/tad843ve-11703141>
14. Kozhushko A., Veretennikov I., Shevtsov V., Karpov V., Dudka O. Analysis of Changes in the Speed and Power Ranges of Dual-Flow On-Board Transmissions Based on the Power Adder Principle. *Innovations in Mechanical Engineering IV*. ICIEng 2025. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2025. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-93554-1\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-031-93554-1_42)
15. Трембач О. С., Кожушко А. П. Розвиток моделі визначення коефіцієнтів втрат об'ємного аксіально-поршневого гідравлічного приводу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування* : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2024. № 2. С. 137 – 149. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2024.2.15>

#### References (transliterated)

1. Pidhorodetskyi M., Yasko V., Kalenyk M. *Obgruntuвання vahomosti osnovnykh parametriv perspektivnykh komplektiv inzhenernoi rozvidky ta rozminuvannya mistsevosti* [Approach to determining assessment of perfectness of engineering reconnaissance and surrounding sets]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Derzhavnoi*

- prykordonnoi sluzhby Ukrainy. Seriya: viiskovi ta tekhnichni nauky. 2024. 94(1). P. 165–175.
2. Hassan M. I., Ahmat D., Ouya S. Technologies behind the humanitarian demining: a review. *International Conference on Smart Applications, Communications and Networking (SmartNets)*, 2024. pp. 1-7. <https://doi.org/10.1109/SmartNets61466.2024.10577706>
  3. Rejeb A., Rejeb K., Simske S.J., Treiblmaier H. Humanitarian Drones: A Review and Research Agenda. *Internet Things*. 2021. 16. 100434. <https://doi.org/10.1016/J.IOT.2021.100434>
  4. Cepolina E.E., Parmiggiani A., Canali C., Cannella F. Disarmadillo: an open source, sustainable, robotic platform for humanitarian demining. *ACTA IMEKO*. 2022. [https://doi.org/10.21014/acta\\_imeko.v11i3.1262](https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v11i3.1262)
  5. Hasselmann K., Malizia M., Caballero R., Poliano F., Govindaraj S., Stigler J., Ichenko O., Bajic M., Cubber G.D. A multi-robot system for the detection of explosive devices. *ArXiv*. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.14167>.
  6. Oladunjoye O., Maffattone Ch., Al-Nawal J., Fasullo S., Greenspan E., Koller J., Nikulin A., de Smet T., Clayton G.M. Omnidirectional All-Terrain Screw-Driven Robot Design. *Modeling, and Application in Humanitarian Demining*, IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55, Is. 27. pp. 7-12. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.480>
  7. Li Ch., Lewis K. The Need for and Feasibility of Alternative Ground Robots to Traverse Sandy and Rocky Extraterrestrial Terrain. *Adv. Intell. Syst.* 2022. 2100195. <https://doi.org/10.1002/aisy.202100195>.
  8. Kharchenko O., Vlasenko V., Voinovskiy V., Maidanovych V. *Analiz suchasnykh tekhnichnykh rishen dlia mekhanizovanoho rozminuvannia silskohospodarskykh uhid v Ukraini* [Analysis of modern technical solutions for mechanized demining of agricultural lands in Ukraine]. Tekhniko-tekhnolohichni aspekty rozvytku ta vyprovuvannia novoi tekhniki i tekhnolohii dlia silskoho hospodarstva Ukrainy. 2025. Vol.1. No. 36(50). P. 99–111.
  9. Petrişor S.M., Simion M., Bârsan G., Hancu O. Humanitarian Demining Serial-Tracked Robot: Design and Dynamic Modeling. *Machines*. 2023. 11(5):548. <https://doi.org/10.3390/machines11050548>.
  10. Camacho-Sanchez C., Yie-Pinedo R., Galindo G. Humanitarian demining for the clearance of landmine-affected areas. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2023. Vol.88. 101611, <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101611>.
  11. Rebrov O.Yu., Korobka T.O., Lakhman S.V. *Matematychna model dyzelnoho dvyhuna v bezrozmirnykh velychynakh z urakhuvanniam yoho zavantazhennia i podachi palyva* [Mathematical model of a diesel engine in dimensionless quantities taking into account its loading and fuel supply]. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu “KhPI”. Kharkiv: NTU “KhPI”, 2012. No. 19. P. 31–36.
  12. Rebrov O. Yu. Vybir parametriv shyn silskohospodarskykh traktoriv : monohrafiia [Selection of tire parameters for agricultural tractors: monograph]. Kharkiv : Miroshnychenko O. A., 2021, 302 p.
  13. Volvo Penta TAD843VE. Tekhnichni kharakterystyky ta spetsyfikatsii [Elektronnyi resurs]. LECTURA Specs. Available at: <https://www.lectura-specs.com.ua/ua/model/komponenti/dviguni-volvo-penta/tad843ve-11703141>
  14. Kozhushko A., Veretennikov I., Shevtsov V., Karpov V., Dudka O. Analysis of Changes in the Speed and Power Ranges of Dual-Flow On-Board Transmissions Based on the Power Adder Principle. *Innovations in Mechanical Engineering IV*. ICIEng 2025. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2025. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-93554-1\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-031-93554-1_42)
  15. Trembach O.S., Kozhushko A.P. *Rozvytok modeli vyznachennia koefitsientiv vtrat obiemnoho aksialno-porshnevoho hidravlichnoho pryvodu* [Development of a model for the determination the loss coefficients of volume axial piston hydraulic drives]. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu “KhPI”. Seriya: Avtomobile- ta traktorobuduvannia. Kharkiv: NTU “KhPI”, 2024. No. 2. P. 137–149.

Надійшла (received) 03.05.2026

Стаття прийнята до друку 20.05.2026

Опублікована 29.05.2026

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Кожушко Андрій Павлович / Kozhushko Andrii** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри автомобіле- та тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4725-5911>; тел.: (057) 707-64-64; e-mail: [Andreykozhushko7@gmail.com](mailto:Andreykozhushko7@gmail.com).

**Надточий Сергій Вячеславович / Nadochyi Sergii** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр кафедри автомобіле- та тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6885-464X>; тел.: (057) 707-64-64; e-mail: [Serhii.Nadochyi@mit.khpi.edu.ua](mailto:Serhii.Nadochyi@mit.khpi.edu.ua).

**Шуба Сергій Олександрович / Shuba Sergii** – головний конструктор ТОВ «УАТ Інжиніринг», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2260-9302>; тел.: (057) 728-41-41; e-mail: [shubaserg@ukr.net](mailto:shubaserg@ukr.net).

**Якунін Максим Євгенович / Yakunin Maksym** – доктор філософії (Ph.D), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автомобіле- і тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4918-6558>; e-mail: [yakunin\\_maksim92@ukr.net](mailto:yakunin_maksim92@ukr.net)