

Захарчук В.І., Цикун Ю.О., Захарчук Ю.В.
Луцький національний технічний університет**ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РУХУ
КОЛІСНОГО ТРАКТОРА У ЇЗДОВОМУ ЦИКЛІ**

Колісні трактори часто використовуються в якості технологічних транспортних засобів. Сформовано їздовий цикл для використовуваного в якості технологічного транспортного засобу колісного трактора, який включає основні режими руху трактора: розгін, рух з постійною швидкістю та сповільнення. Описана математична модель руху колісного трактора за сформованим їздовим циклом, в якій окремі етапи руху описуються своїми рівняннями. Така математична модель буде використана для дослідження паливо-економічних та екологічних показників колісного трактора під час роботи його двигуна на різних паливах. Наведені результати експериментальних досліджень дизеля Д-243 під час роботи на різних паливах у вигляді навантажувальних характеристик. Вказані результати використані в математичній моделі руху колісного трактора для опису двигуна як джерела енергії, споживача моторного палива та повітря та джерела викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами. Наведена методика перевірки адекватності математичної моделі руху колісного трактора шляхом порівняння результатів розрахунків окремих параметрів з результатами експериментальних досліджень. Наведені результати перевірки адекватності математичної моделі, які показали, що математична модель руху колісного трактора достатньо адекватно описує рух колісного трактора в експлуатаційних умовах і може бути використана для оцінки ефективності заходів, направлених на зменшення шкідливих викидів колісного трактора в умовах експлуатації.

Ключові слова: математична модель, колісний трактор, їздовий цикл, дорожні випробування, перевірка адекватності.

Постановка проблеми. В даний час перед людством стоять дві глобальні проблеми: світовий дефіцит нафти та забруднення навколишнього середовища викидами шкідливих речовин з відпрацьованими газами (ВГ) різних видів техніки. Суттєво вирішити ці проблеми можна використанням альтернативних моторних палив.

На сьогоднішній день у нашій державі є великий парк колісних транспортних засобів та мобільної сільськогосподарської техніки, які працюють на паливі нафтового походження. Але вартість палива весь час зростає, погіршується також екологічна ситуація в країні. Одним з основних шляхів виходу з цієї ситуації є адаптація техніки до роботи на альтернативних паливах[1].

Значна частина колісних тракторів, зокрема класу 1,4, в сільськогосподарському виробництві, комунальному господарстві та промисловості використовується в якості технологічного транспорту [2]. В цьому випадку передбачений їх заїзд у приміщення та тривала робота в цих приміщеннях. Вже через декілька хвилин роботи в двигуна в закритому приміщенні гранично допустимі концентрації викидів з відпрацьованими газами (ВГ) шкідливих речовин (ШР) перевищують допустиму норму. В зв'язку з цим, дослідження, спрямовані на підвищення екологічної безпеки цього виду транспорту шляхом обґрунтованого вибору альтернативних моторних палив, є актуальними.

Можливість застосування певного виду альтернативного моторного палива (АМП) визначається його регіональними ресурсами, співвідношенням цін між альтернативними та традиційними паливами, затратами на адаптацію двигунів для роботи на АМП, на інфраструктуру доставки, зберігання та заправки техніки. Стосовно технологічних транспортних засобів, то на даний час пріоритет щодо АМП належить біопаливам на основі рослинних олій [3].

Переведення транспортних засобів, які знаходяться в експлуатації, на альтернативні палива призводить до зміни ряду їх експлуатаційних якостей, в тому числі до зміни екологічних характеристик відпрацьованих газів. В цьому випадку правильний вибір палив дозволяє вирішити відразу два завдання: підвищити екологічну безпеку транспортних засобів (ТЗ) та зменшити використання нафти на потреби транспорту.

Зазвичай моделювання руху транспортних засобів виконується за режимами стандартних їздових циклів, які імітують рух транспортних засобів [4]. Оскільки стандартні їздові цикли для колісних тракторів, використовуваних в якості технологічного транспорту відсутні, то для оцінки показників такої техніки сформований їздовий цикл (рис. 1), який включає основні режими його руху. **Метою роботи** є перевірка адекватності математичної моделі руху колісного трактора в прийнятому їздовому циклі.

Результати досліджень. Визначення показників колісного трактора під час роботи на біопаливі здійснювалось шляхом моделювання його руху на математичній моделі в прийнятому їздовому циклі, який показаний на рис. 1.

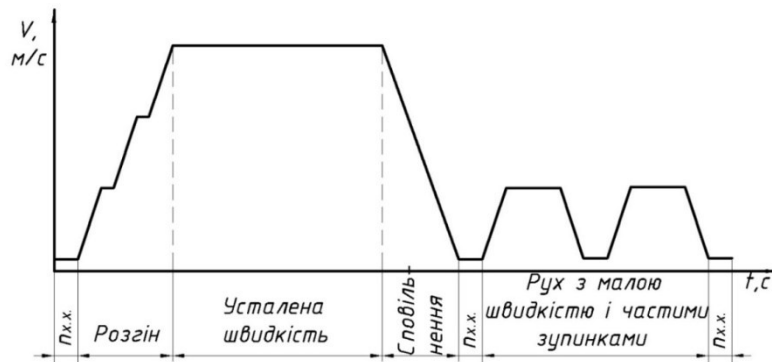


Рис. 1 – Їздовий цикл засобів технологічного транспорту

Математична модель [4, 5] представлена низкою диференціальних і алгебраїчних рівнянь, що описують закономірності зміни швидкості трактора, витрати палива і викидів шкідливих речовин (ШР) у відпрацьованих газах (ВГ) на кожній елементарній ділянці їздового циклу. Вхідними параметрами математичної моделі прийнята величина переміщення важеля керування паливоподачею φ_{op} і швидкість V_{op} переміщення важеля, передаточне число U_i коробки передач, час переключення передач t_{cki} і частота обертання двигуна n_d , при якій оператор включає більш високу передачу при розгоні. Задані оператором φ_{op} , V_{op} і n_d визначають крутний момент двигуна. Крутним моментом і частотою обертання визначаються режими роботи двигуна, годинні витрати палива G_n і повітря $G_{нов}$, вміст у ВГ сажі S , оксидів вуглецю CO , вуглеводнів C_mH_n і оксидів азоту NO_x [4].

Вихідним параметром двигуна є крутний момент M_k , величина якого при заданому оператором положенні важеля керування паливоподачею визначається умовами на виході: характеристиками дороги (поздовжній ухил i , коефіцієнт опору коченню коліс трактора та причепа f), власною масою тракторного поїзда M_0 і масою вантажу $M_в$, обраної оператором передачі U_i , фактором опору повітря kF , тому що ці умови визначають швидкість руху трактора і, відповідно, частоту обертання колінчастого вала двигуна.

В математичній моделі імітується рух колісного трактора з причепом по дорозі, визначаються в кожний момент виконання циклу режими роботи його двигуна (частота обертання і крутний момент двигуна), виходячи з яких за експериментально визначеними в роботі характеристиками з урахуванням особливостей роботи двигуна в неусталених режимах та виду палива розраховується витрата палива, шкідливі викиди, тягово-швидкісні властивості трактора на елементарній ділянці шляху, в цілому в режимі та за весь цикл руху трактора.

Наприклад, рушання трактора з пробуксовуючим зчепленням описується рівняннями для двигуна і веденої частини зчеплення.

Рух двигуна описується рівнянням:

$$\frac{dn_d}{dt} = (M_{кн} - M_{зч}) \cdot \frac{30}{J_d \cdot \pi}, \quad (1)$$

де $\frac{dn_d}{dt}$ – сповільнення чи прискорення колінчастого вала двигуна, $хв^{-1} \cdot c^{-1}$; J_d – момент інерції двигуна, $(кг \cdot м^2)$; $M_{кн}$ – крутний момент двигуна в неусталеному режимі роботи, $Нм$; $M_{зч}$ – момент тертя зчеплення, $Нм$.

Рівняння руху трактора, отримане з тягового балансу, має вигляд:

$$\frac{dV_{mp}}{dt} = \frac{1}{\delta \cdot (M_o + M_{np} + M_e) \cdot \left(1 + \frac{\lambda \cdot U_i^2 \cdot U_0^2 \cdot U_k^2 \cdot \eta_r}{\delta \cdot (M_o + M_{np} + M_e) \cdot r_k \cdot r_d} \right)} \times \left(\frac{M_k \cdot U_i^2 \cdot U_0^2 \cdot U_k^2 \cdot \eta_r}{r_d} - P_f \pm P_i - P_w - P_{kp} \right), \quad (3)$$

де M_0 – маса колісного трактора, кг; M_{np} – маса причепа, кг; M_e – маса вантажу, кг; r_0 – динамічний радіус колеса, м; U_i – передаточне число i -ї передачі; U_0 – передаточне число головної передачі; U_k – передаточне число колісної передачі; P_f, P_b, P_w – сили опору відповідно коченню, підйому та повітря, Н; δ – коефіцієнт, який враховує маси трактора, що обертаються; λ – експериментальний коефіцієнт неусталеного режиму; η_T – ККД трансмісії; $P_{кр}$ – сила тяги на кроюку, Н.

В математичній моделі використовуються результати експериментальних досліджень двигуна під час роботи на новому біопаливі. Були проведені стендові випробування дизеля Д-243 при його роботі на ізопропіловому ефірі ріпакової олії (ІЕРО) та нафтовому ДП в результаті яких отримані навантажувальні характеристики (рис. 2) при різних частотах обертання з заміром викидів шкідливих речовин. Як видно з наведених характеристик, потужність N_e дизеля при роботі на цих паливах практично однакова. У випадку роботи дизеля на ІЕРО має місце збільшення питомої витрати g_e палива в межах 4...6 % в результаті меншої теплоти згоряння та збільшення концентрації оксидів азоту NO_x у відпрацьованих газах через більший вміст кисню в біопаливі та підвищення температури робочого тіла в циліндрах дизеля [6]. Димність ВГ є меншою при роботі на біопаливі, особливо при навантаженнях близьких до максимальних. Це говорить про більш повне вигорання сажі в циліндрах дизеля.

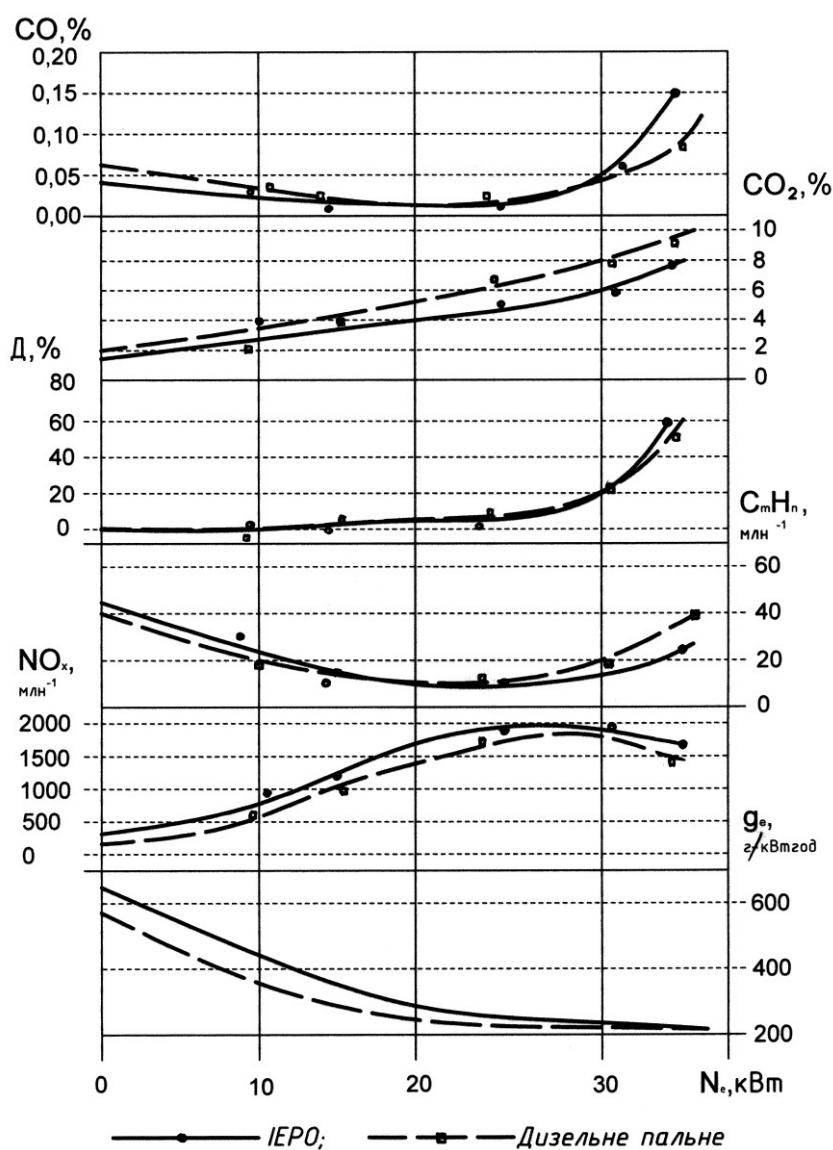


Рис. 2. Навантажувальні характеристики дизеля Д-243 з заміром викидів ШР

Відхилення величин решти порівнюваних показників знаходиться в межах можливої точності їх вимірювання. Концентрація продуктів неповного згоряння при низьких навантаженнях вищі при роботі на ІЕРО, але при високих навантаженнях ситуація протилежна.

Перевірка адекватності математичної моделі руху колісного трактора проводилась шляхом порівняння розрахункових швидкостей трактора з даними експериментальних досліджень, отриманих при реалізації їздового циклу на колісному тракторі.

Дорожні випробування трактора МТЗ-80 з причепом 2ПТС-4, який перевозив вантаж, проводились за прийнятим їздовим циклом. Тракторний дизель було переобладнано для роботи на біодизельному паливі.

Під час дорожніх випробувань визначались витрата палива $G_{п}$, швидкість руху V , час t руху трактора в циклі та відстань S , на якій проводились дослідження руху колісного трактора.

Для перевірки адекватності математичної моделі створений спеціальний апаратний комплекс, який дає можливість вимірювати і реєструвати параметри дослідного зразка в режимі реального часу під час руху в їздовому циклі. Такими параметрами обрано: положення важеля керування паливopoдачею, положення рейки паливного насоса та швидкість руху трактора. Основою апаратного комплексу є магнітоелектричний осцилограф К12-22.

Розрахунки на математичній моделі за режимами їздового циклу проводились для трактора масою 3160 кг з причепом з вантажем масою 2550 кг. Коефіцієнт опору кочення прийнятий $f=0,016$.

На рис. 3. показано фрагмент їздового циклу колісного трактора при дорожніх випробуваннях та при моделюванні руху на математичній моделі.

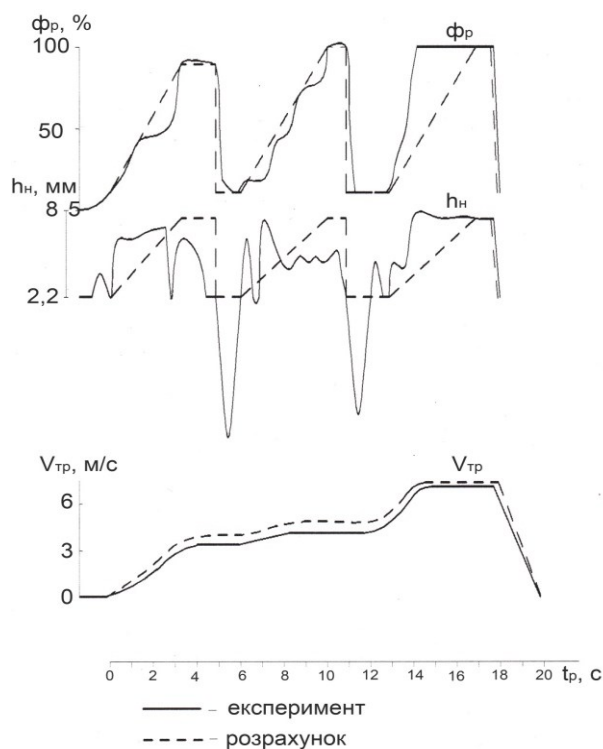


Рис. 3. Діаграми зміни показників колісного трактора МТЗ-80 при русі за їздовим циклом з використанням біодизельного палива

За даними рис. 3 видно, що час t та швидкість руху V , отримані шляхом розрахунку, відрізняється від даних, отриманих в результаті експерименту, на 2,5% та 1,5%. Витрата палива $G_{п}$, отримана в результаті експерименту, відрізняється від розрахункових даних до 5%, тобто математична модель досить точно описує характер руху колісного трактора в їздовому циклі і може бути використана для оцінки його показників під час роботи на різних паливах.

Висновки. Математична модель руху колісного трактора достатньо адекватно описує рух колісного трактора в експлуатаційних умовах і може бути використана для оцінки ефективності заходів, направлених на зменшення шкідливих викидів колісного трактора в умовах експлуатації.

1. Захарчук В.І. Аналіз властивостей альтернативних палив для автотракторних дизелів / В.І.Захарчук, В.В.Ткачук // Наукові нотатки: міжвузівський збірник. – 2010. – Вип. 28. – С. 227–230.
2. Білоконь Я.Ю., Окоча А.І. Трактори і автомобілі. – К.:Урожай, 2002. – 324 с.
3. Захарчук В.І. Експлуатаційні показники біодизельних палив / В.І.Захарчук, В.В.Ткачук // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. - 2010. – Вип. № 7. – С. 98–102.

4. Гутаревич Ю.Ф. Снижение вредных выбросов автомобиля в эксплуатационных условиях. – К.: Выща шк., 1991. – 179 с.
5. Захарчук О.В. Особливості математичної моделі руху колісного трактора з газовим двигуном// Наукові нотатки: Міжвузівський збірник. За напрямом “ Інженерна механіка ”. – Випуск 28. – 2010.
6. Захарчук В.І. Перспективи застосування ізопропілового ефіру ріпакової олії в якості дизельного палива / В.І.Захарчук, В.В.Ткачук // Сільськогосподарські машини: зб. наук. ст. – 2010. – Вип. №20. – С. 78–84.

REFERENCES

1. Zakharchuk, V., Tkachuk, V. (2010) The analysis properties of alternative fuels for autotractor diesel engines. [Analiz vlastyvostryy al'ternatyvnykh palyv dlya avtotraktornykh dyzeliv]. *Naukovi Notatky*, Vol. 28., pp. 78-85.
2. Bilokon' Ya., Okocha A. (2002). *Tractors and cars*. [Traktory i avtomobil]. Kyiv, Urozhai Publ. 324 pp.
3. Zakharchuk, V. (2010). Operating indicators of biodiesel fuels. [Ekspluatatsiyni pokaznyky biodyzel'nykh palyv]. *Bulletin of the Volodymyr Dal' East Ukrainian National University*. Vol.6., pp. 98-102.
4. Hutarevych Yu. (1991). *Reduction of harmful emissions vehicle during operating conditions*. [Snizheniye vrednykh vybrosov avtomobilya v ekspluatatsionnykh usloviyakh]. Kyiv, Vyshcha shkola Publ. 179 pp.
5. Zakharchuk, O.(2010). Peculiarities of mathematical model motion of wheeled tractor during operating on gas engine. [Osoblyvosti matematychnoyi modeli rukhu kolisnoho traktora z hazovym dvyhunom]. *Naukovi Notatky*, Vol. 28.
6. Zakharchuk, V., Tkachuk, V. Prospects of application isopropyl ester of rapeseed oil as a diesel fuel. [Perspektyvy zastosuvannya izopropilovoho efiru ripakovoyi oliyi v yakosti dyzel'noho palyva]. *Silskohospodarski mashyny*, Vol. 20., pp. 78-84.

Захарчук В.І., Цикун Ю.А., Захарчук Ю.В. Проверка адекватности математической модели движения колесного трактора в ездовом цикле.

Колесные тракторы часто используются в качестве технологических транспортных средств. Сформирован ездовой цикл для используемого в качестве технологического транспортного средства колесного трактора, который включает основные режимы движения трактора: разгон, движение с постоянной скоростью и замедление. Описанная математическая модель движения колесного трактора по сложившемуся ездовым циклом, в которой отдельные этапы движения описываются своими уравнениями. Такая математическая модель будет использована для исследования топливно-экономических и экологических показателей колесного трактора при работе его двигателя на различных топливах. Приведенные результаты экспериментальных исследований дизеля Д-243 при работе на различных топливах в виде нагрузочных характеристик. Указанные результаты использованы в математической модели движения колесного трактора для описания двигателя как источника энергии, потребителя моторного топлива и воздуха и источники выбросов вредных веществ с отработавшими газами. Приведенная методика проверки адекватности математической модели движения колесного трактора путем сравнения результатов расчетов отдельных параметров результатам экспериментальных исследований. Приведенные результаты проверки адекватности математической модели, которые показали, что математическая модель движения колесного трактора достаточно адекватно описывает движение колесного трактора в эксплуатационных условиях и может быть использована для оценки эффективности мероприятий, направленных на уменьшение вредных выбросов колесного трактора в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: математическая модель, колесный трактор, ездовой цикл, дорожные испытания, проверка адекватности.

Zakharchuk V., Tsykun Yu., Zakharchuk Yu. Adequacy verification of the mathematical model of wheel tractor in driving cycle.

Wheel tractors are often used as technological vehicles. The driving cycle was generated for a wheel tractor as a technological vehicle. It includes the main modes of the vehicle: acceleration, motion with constant speed and deceleration. Driving cycle consists of two stages. The first stage is tractor movement with almost maximal speed, which describes cargo delivery for production. The second stage is low tractor motion with frequent stops, which describes the tractor movement in the production areas. The mathematical model describes wheel tractor motion in the generated driving cycle. Separate stages of motion are described by their equations. Besides the equation of the tractor motion is obtained from the equation of tractor traction balance. Differential equations of the mathematical model are solved by the Runge-Kutt method. This mathematical model will be used to study the tractors fuel consumption and environmental performance with its engine work on different fuels. The results of experimental studies of diesel D-243 during its operating on different fuels are shown, including the new biodiesel fuel. Load characteristics with concentrations of harmful substances in the exhaust gases are shown too. The obtained characteristics was approximated by polynomial dependencies by least squares method and used in the mathematical model of the wheel tractor motion to describe the tractors engine as an energy source, as consumer of fuel and air and as a source of emissions with exhaust gases. Adequacy of mathematical model of wheel tractor movement was cheked by comparing the results of calculations of the individual parameters with the experimental results obtained during the driving tests.

The results of the mathematical model adequacy verifying showed that the maximum deviation of the calculated and experimental values does not exceed 5%. Therefore, the mathematical model of the wheel tractor adequately describes its motion in operating conditions. The mathematical model may be used for describing of the

wheel tractor parameters and can be used for effectiveness evaluation of activities which designed to reduce wheel tractor emissions in operating conditions.

Keywords: mathematical model, wheeled tractor, driving cycle, road tests, adequacy verification.

АВТОРИ:

ЗАХАРЧУК Віктор Іванович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобілів та транспортних технологій, Луцький національний технічний університет

ЦИКУН Юрій Олександрович, аспірант кафедри автомобілів та транспортних технологій, Луцький НТУ,

ЗАХАРЧУК Юрій Вікторович, аспірант кафедри автомобілів та транспортних технологій, Луцький НТУ.

АВТОРЫ:

ЗАХАРЧУК Виктор Иванович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автомобилей и транспортных технологий, Луцкий национальный технический университет;

Цыкун Юрий Александрович, аспирант кафедры «Автомобили и транспортные технологии», Луцкий НТУ;

ЗАХАРЧУК Юрий Викторович, аспирант кафедры «Автомобили и транспортные технологии», Луцкий НТУ.

AUTHORS:

Viktor ZAKHARCHUK, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Motor Cars and Transport Technologies Department, Lutsk National Technical University;

Yuriy TSYKUN, Postgraduate Student of Motor Cars and Transport Technologies Department, Lutsk National Technical University;

Yuriy ZAKHARCHUK, Postgraduate Student of Motor Cars and Transport Technologies Department, Lutsk National Technical University.

Стаття надійшла в редакцію 16.04.2016р.