

**Самородов В. Б.**

*доктор технічних наук, професор,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут», Україна;  
e-mail: samorodovvadimat@gmail.com; ORCID ID: 0000-0002-2965-5460*

**Кривоконь О. Г.**

*доктор історичних наук, професор,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут», Україна;  
e-mail: kryvokon.og@gmail.com; ORCID ID: 0000-0002-2492-7371*

## **МАТЕМАТИЧНИЙ ІНСТРУМЕНТАРІЙ ОЦІНКИ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ТРАКТОРІВ**

**Анотація.** Присвячено введенню комплексної порівняльної оцінки економічної ефективності сільськогосподарських тракторів. Установлено, що до теперішнього часу відсутній узагальнений комплексний показник, який здатний оцінювати економічну ефективність роботи машино-тракторних агрегатів (МТА), показник, який не лише обґрунтовує раціональний вибір виду МТА, а й забезпечує мінімальну складову експлуатаційних витрат на обробіток землі в собівартості кінцевої сільськогосподарської продукції на ринку. Досвід створення в Україні нових тракторів (трактори ХТЗ-21021, ХТЗ-242К із безступінчастими гід्रोоб'ємно-механічними трансмісіями) уперше на пострадянському просторі на Харківському тракторному заводі привели до необхідності розвитку математичного інструментарію моделювання і прогнозування порівняльної оцінки економічної ефективності МТА на їх базі. Запропонований алгоритм дозволяє встановити нові взаємозв'язки між основними техніко-економічними параметрами і оцінкою економічної ефективності трактора (у вимірі втрат гривня на гектар обробітку площі) з урахуванням втрат у безступінчастих гідрооб'ємно-механічних трансмісіях і втрат на буксування колісного трактора на прикладі технологічного процесу оранки. Розроблений математичний інструментарій моделювання оцінки економічної ефективності вперше перевірено у форматі чисельного експерименту для тракторів із застосуванням безступінчастих гідрооб'ємно-механічних трансмісій (ГОМТ) типу ГОМТ-1С і ГОМТ-2С, розроблених на кафедрі «Автомобіле- і тракторобудування» НТУ «ХПІ» для тракторів ХТЗ- 21021 і ХТЗ-242К Харківського тракторного заводу (ПАТ «ХТЗ»). Отримано весь спектр кінематичних, силових, енергетичних характеристик ГОМТ та основні техніко-економічні показники машино-тракторного агрегату, оптимізовано ширину захвату плуга за критерієм максимального коефіцієнта корисної дії ГОМТ, знайдено максимум значення продуктивності, мінімум погектарної витрати пального, мінімум втрат у гривнях на обробіток трактором одного гектара площі. Представлений математичний інструментарій дозволяє у форматі чисельного експерименту порівнювати ефективність колісних тракторів, у складі яких працюють як ступінчасті гідромеханічні трансмісії, так і безступінчасті ГОМТ.

**Ключові слова:** техніко-економічні параметри, економічна ефективність, машино-тракторний агрегат, витрата пального, експлуатаційні витрати, продуктивність, функціонал.

Формул: 16; рис.: 0; табл.: 1; бібл.: 11.

**Samorodov V. B.**

*Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine;  
e-mail: samorodovvadimat@gmail.com; ORCID ID: 0000-0002-2965-5460*

**Kryvokon O. G.**

*Doctor of Historical Sciences, Professor,  
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine;  
e-mail: kryvokon.og@gmail.com; ORCID ID: 0000-0002-2492-7371*

## MATHEMATICAL TOOLING OF ESTIMATION OF ECONOMIC EFFICIENCY OF AGRICULTURAL TRACTORS

**Abstract.** Work is sanctified to introduction of complex comparative estimation of economic efficiency of agricultural tractors. It is set that to present tense the absent is generalized complex index, that is able to estimate economic efficiency of work of machine- tractor aggregates (MTA), index, that not only grounds the rational choice of type of MTA but also provides the minimum constituent of running expenses on treatment of earth in an eventual agricultural unit cost at the market. Experience of creation on Ukraine of new tractors (tractors of XT3-21021, XT3-242K with HVMT) first on post-soviet space at the Kharkiv tractor plant resulted in the necessity of development of mathematical tool of design and prognostication of comparative estimation of economic efficiency of MTA on their base. An offer algorithm first allows to set new intercommunications between basic technical and economic parameters and estimation of economic efficiency of tractor (in measuring of losses a hryvnya is on the hectare of treatment of area). The worked out mathematical tool of design of estimation of economic efficiency is first tested in the format of numeral experiment for tractors with application of HVMT as ГОМТ-1С and ГОМТ-2С, worked out on the department of department of "Cars and tractors" of National Technical University "Kharkov polytechnic institute" (NTU "KhPI") for the tractors of XT3-21021 and XT3-242K for " Kharkov tractor plant". Is got all spectrum of kinematics, power, power descriptions of HVMT and basic technical and economic parameters on the whole machine- tractor aggregate, the width of capture of plough is optimized on the criterion of maximal output-input of HVMT ratio, the value of the productivity is found at most, minimum per hectare expense of fuel, minimum losses in hryvnyas on treatment tractor 1 hectare area. The presented mathematical tool allows in the format of numeral experiment to compare efficiency of the wheeled tractors both step hydraulic-mechanical transmissions work in composition that and of HVMT. The brought mathematical tooling over allows to get the comparative estimation of economic efficiency of different home and foreign tractors.

**Keywords:** technical and economic parameters, economic efficiency, machine-tractor aggregate, expense of fuel, running expenses, productivity, functional.

**JEL Classification** L21, L62

Formulas: 16; fig.: 0; tabl.: 1; bibl.: 11.

**Самородов В. Б.**

*доктор технических наук, профессор,*

*Национальный технический университет*

*«Харьковский политехнический институт», Украина;*

*e-mail: samorodovvadimat@gmail.com; ORCID ID: 0000-0002-2965-5460*

**Кривоконь А. Г.**

*доктор исторических наук, профессор,*

*Национальный технический университет*

*«Харьковский политехнический институт», Украина;*

*e-mail: kryvokon.og@gmail.com; ORCID ID: 0000-0002-2492-7371*

## МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТРАКТОРОВ

**Аннотация.** Посвящено введению комплексной сравнительной оценки экономической эффективности сельскохозяйственных тракторов. Установлено, что до настоящего времени отсутствует комплексный показатель, который способен оценивать экономическую эффективность машино-тракторных агрегатов (МТА), показатель, который не только обосновывает рациональный выбор вида МТА, но и обеспечивает минимальную составляющую эксплуатационных расходов на обработку земли в себестоимости конечной сельскохозяйственной продукции на рынке. Опыт создания на Украине новых тракторов (трактора XT3-21021, XT3-242K с бесступенчатыми гидрообъемно-механическими

трансмиссиями) впервые на постсоветском пространстве на Харьковском тракторном заводе привел к необходимости развития математического инструментария для моделирования и прогнозирования сравнительной оценки экономической эффективности МТА на базе таких трансмиссий. Для тракторов ПАТ «ХТЗ» ХТЗ-21021 и ХТЗ-242К с применением бесступенчатых гидрообъемно-механических трансмиссий (ГОМТ) типа ГОМТ-1С и ГОМТ-2С, разработанных на кафедре «Автомобиле- и тракторостроение» НТУ «ХПИ» получен весь спектр кинематических, силовых, энергетических характеристик ГОМТ и основные технико-экономические показатели для машино-тракторного агрегата, оптимизирована ширина захвата плуга по критерию максимального коэффициента полезного действия ГОМТ, найден максимум значения производительности, минимум погектарной затраты топлива, минимум потерь в гривнях на обработку трактором одного гектара площади. Приведенный математический аппарат позволяет получить и сравнительную оценку экономической эффективности различных отечественных и зарубежных тракторов.

**Ключевые слова:** технико-экономические параметры, экономическая эффективность, машино-тракторный агрегат, затраты топлива, эксплуатационные расходы, производительность, функционал.

Формул: 16; рис.: 0; табл.: 1; библи.: 11.

**Вступ.** Розвиток аграрного сектора економіки України істотно визначається розвитком промислового базису в області сільськогосподарського машинобудування, зокрема у вітчизняному тракторобудуванні [3; 7; 10]. Порівняння економічної ефективності роботи вітчизняних і зарубіжних сільськогосподарських тракторів досі робиться за окремими, хоча і важливими техніко-економічними показниками — продуктивністю, витратами палива, амортизаційними відрахуваннями, втратами і тепловиділеннями в двигуні і трансмісії, втратам на буксування, по надійності систем трактора і навісного устаткування, за показниками ергономічності, по витратах на технічне обслуговування і за іншим експлуатаційними витратами. Відсутній деякий узагальнений комплексний показник економічної ефективності роботи машино-тракторних агрегатів (МТА), який не лише обґрунтовує раціональний вибір виду МТА, але й забезпечує і гарантує мінімальну складову експлуатаційних витрат на обробку землі в собівартості кінцевої сільськогосподарської продукції на ринку. Активне використання нового перспективного напрямку у світовому тракторобудуванні — безступінчастого регулювання швидкості та тягового зусилля, розробка і випуск в Україні таких тракторів уперше на пострадянському просторі на Харківському тракторному заводі (трактори ХТЗ- 21021, ХТЗ-242К з безступінчастими гідрооб'ємно-механічними трансмісіями [2; 4; 6; 8; 9]) привели до необхідності розвитку інструментарію моделювання і прогнозування порівняльної оцінки економічної ефективності МТА на їх базі.

**Аналіз досліджень та постановка завдання.** Питання розробки математичної моделі, що описує взаємозв'язки кривокового навантаження трактора з втратами в гідрооб'ємних передачах (ГОП) і ГОМТ, з урахуванням втрат на буксування колісного трактора в технологічному процесі оранки з кінематичними, силовими і енергетичними характеристиками ГОМТ і МТА уперше поставлені і вирішувалися в роботах [1; 5; 6; 11].

Пропозиція оптимізаційного алгоритму для реалізації математичної моделі, що описує взаємозв'язки робочих параметрів трансмісій з урахуванням втрат в ГОП, ГОМТ, втрат на буксування колісного трактора [1; 3; 6] і спроба ввести формалізовану комплексну оцінку економічної ефективності МТА представили автори робіт [5, 11]. Розрахунково-теоретичній апробації вказаного оптимізаційного алгоритму присвячена робота [11]. Проте в усіх вказаних нечисленних роботах на цю тему більшою мірою увага акцентувалася на отриманні технічних параметрів трансмісій і МТА.

Метою роботи є розробка інструментарію моделювання і прогнозування порівняльної оцінки економічної ефективності МТА (комплексної оцінки у вимірі втрат гривня на гектар обробки ґрунту) на основі алгоритму за визначенням основних техніко-економічних

характеристик трактора із застосуванням безступінчастих гідрооб'ємно-механічних трансмісій (ГОМТ) типу ГОМТ-1С і ГОМТ-2С, розроблених для тракторів ХТЗ- 21021 і ХТЗ-242К на кафедрі «Автомобіле- і тракторобудування» НТУ «ХПІ» для ПАТ «ХТЗ» [11].

**Результати дослідження.** Встановимо взаємозв'язки між основними робочими параметрами і характеристиками двигуна, трансмісії і саме трактора. Це є взаємозв'язки між буксуванням колісного трактора  $\delta$  і ефективним крюковим навантаженням  $P_{\text{КР}}$ , теоретичною  $v_T$  і дійсною  $v$  швидкостями трактора, перепадом тиску навантаження  $\Delta p$  в ГОП, об'ємними втратами  $\Delta Q$  і загальними втратами потужності в ГОП  $\Delta N_{\text{ГОП}}$ , ККД ГОП  $\eta_{\text{ГОП}}$  і ККД ГОМТ  $\eta_{\text{ТР}}$ , продуктивністю  $S$ , погектарною  $Q$  витратою палива. І нарешті встановимо взаємозв'язок вказаних робочих параметрів і характеристик з критерієм  $D^*$  економічної ефективності МТА, що відображає фінансові витрати на обробку гектара площі.

Рівняння тягового балансу потужності колісного трактора, обладнаного ГОМТ, в технологічному режимі оранки має вигляд [5]:

$$[N - \Delta N_{\text{ГОП}}(B, e) - \Delta N_{\text{МЕХ}}(B, e)] \cdot (1 - \delta(B, e)) = [m \cdot g \cdot f + P_{\text{КР}}^{\text{ист}}(B, v(B, e))] \cdot v(B, e). \quad (1)$$

Тут  $N = M_{\text{Д}} \omega_{\text{Д}}$  — потрібна навантажувальна потужність двигуна;

$\omega_{\text{Д}}, M_{\text{Д}}$  — кутова швидкість і момент на колінчастому валі двигуна;

$\Delta N_{\text{ГОП}}(B, e), \Delta N_{\text{МЕХ}}(B, e)$  — сумарні втрати в ГОП і в механічній частині ГОМТ відповідно, як функції ширини захвату плуга  $B$  і параметра регулювання  $e$  гідрооб'ємної передачі;

$m$  — маса трактора;

$f^*$  — коефіцієнт опору перекочуванню трактора;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $P_{\text{КР}} = B \cdot h \cdot k$  — ефективне крюкове навантаження (не враховує «швидкісних» втрат під час перевертання ґрунту), що дорівнює добутку ширини захвату плуга  $B$ , глибини оранки  $h$  і коефіцієнта питомого опору плуга  $k$  для конкретного ґрунту [1];

$\delta(B, e), v(B, e)$  — відповідно, буксування і робоча швидкість трактора, як функції ширини захвату плуга  $B$  і параметра регулювання  $e$ .

Рівняння балансу потужності (1) означає, що корисна потужність двигуна за вирахуванням втрат в ГОП і в механічній частині ГОМТ з урахуванням втрат на буксування витрачається на перекочування трактора і тягову крюкову потужність.

За П. Горячкіним [1], величина сумарного тягового опору плуга  $P_{\text{КР}}^{\text{ист}}$  під час роботи МТА являє собою силу, необхідну для впливу не тільки на постійну масу самого плуга, але і на змінну масу ґрунту залежно від швидкості руху плуга. Сумарний тяговий опір плуга дорівнює:

$$P_{\text{КР}}^{\text{ист}} = f_{\text{ПЛ}} \cdot G_{\text{ПЛ}} + B \cdot h \cdot k \cdot \left( 1 + \frac{\varepsilon_0 \cdot v(B, e)^2}{k} \right), \quad (2)$$

де  $f_{\text{ПЛ}} \cdot G_{\text{ПЛ}}$  — сумарна сила опору тертя плуга вагою  $G_{\text{ПЛ}}$  на ґрунт;

$f_{\text{ПЛ}}$  — коефіцієнт тертя плуга об ґрунт;

$\varepsilon_0$  — коефіцієнт, що враховує швидкісні втрати у формулі (2);

$v(B, e) = v_T(B, e) \cdot (1 - \delta) = \omega_X \cdot r \cdot (1 - \delta)$  — дійсна швидкість трактора;

$v_T(B, e)$  — теоретична швидкість без урахування буксування, визначається реальною кутовою швидкістю  $\omega_X$  вихідної ланки ГОМТ і радіусом тягового колеса  $r$ .

Загальне крюкове навантаження за співвідношенням (2) визначається коефіцієнтом зчеплення  $\phi$ :

$$P_{\text{КР}}^{\text{ист}}(B, v(B, e)) = m \cdot g \cdot \phi = m \cdot g \cdot (\alpha - \beta \cdot e^{-\lambda \cdot \delta}), \quad (3)$$

де  $\alpha, \beta, \lambda$  — емпіричні коефіцієнти.

Продуктивність МТА  $S$ , оснащеного ГОМТ, в процесі оранки з урахуванням коефіцієнта використання змінності  $K_{\text{см}}$  [5,11]:

$$S = K_{\text{см}} \cdot B \cdot v(B, e) \quad (4)$$

За умов  $K_{cm} = 1$  з виразу (4) одержимо продуктивність за ідеальним 100%-м використанням часу на оранці для трактора з ГОМТ. Збільшення продуктивності МТА  $S$ , обладнаного ГОМТ, в процесі оранки за рахунок збільшення технологічної швидкості  $v$  (В, е) понад деякого значення  $v^*$  за формулою (4) за умов заданої номінальної (або максимальної) потужності двигуна  $N = M_d \cdot \omega_d$  призводить за формулою (2) до зменшення ефективного значення  $P_{кр}$  через швидкісні втрати і, як наслідок, — до зменшення добутку параметрів  $B, h$  і  $k$ .

Погектарна витрата палива  $Q$  (кг/га):

$$Q = 10^{-3} \frac{q_N \cdot N}{360 \cdot B \cdot v(B, e)} = 10^{-3} \frac{q_N \cdot M_d \omega_d}{360 \cdot B \cdot v(B, e)}. \quad (5)$$

Пропонується ввести критерій економічної ефективності  $D^*$  різних порівнюваних тракторів, що враховує продуктивність  $S$ , вартість трактора  $C$ , амортизаційні відрахування, погектарну витрату палива  $Q$ , коефіцієнт надійності  $K_{НАД}$  МТА, що враховує питому частку відмов за гарантійний термін експлуатації основних систем трактора та основні експлуатаційні фінансові витрати. Спрощений («початковий») вигляд цей критерій має такий:  $D = S K_{НАД} / C / Q$ . Значення критерію ефективності  $D$  природньо зростає з підвищенням продуктивності  $S$  трактора і коефіцієнта надійності  $K_{НАД}$  і за умов зниження середньої погектарної витрати палива  $Q$ , а також за умов зменшення вартості трактора  $C$ . У роботі [5] було введено адекватніший розгорнутий критерій ефективності МТА  $D$ , що містить точніше оцінювання витрат  $C$  і в обов'язковому порядку оцінювання надійності загалом МТА. Заразом дію критерію буде цілком обґрунтовано для певного строку експлуатації МТА (наприклад, терміну гарантії  $T_0$  годин). Витрати  $C$  в [10] наводяться у вигляді

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5, \quad (6)$$

де, наприклад, укрупнено  $C_1$  — вартість трактора;  $C_2$  — вартість технологічного обладнання;  $C_3$  — витрати на технічне обслуговування МТА на протязі гарантійного терміну  $T_0$ ;  $C_4$  — витрати на позапланове усунення відмов обладнання МТА, яке визначається на підставі експлуатаційної статистики, зазвичай, у відділах контролю якості підприємства виробника і його гарантійних підрозділах;  $C_5$  — заробітна платня тракториста. Можливі ще будь які експлуатаційні витрати, що відносяться до періоду часу  $T_0$ .

Коефіцієнт надійності  $K_{НАД}$  МТА, що враховує питому частку відмов за гарантійний термін  $T_0$  експлуатації технічних систем трактора конструюється таким чином. До таких відмов належать відмови коробки зміни передач  $\Delta N_1$ , відмови двигуна  $\Delta N_2$  і його систем  $\Delta N_3$ , відмови гідравлічної системи  $\Delta N_4$ , відмови ходової системи  $\Delta N_5$ , відмови електрообладнання  $\Delta N_6$ , відмови системи рульового керування  $\Delta N_7$  і т. п. Для визначеності будемо враховувати відмови не нижче II групи. Під час загального спостереження  $N$  тракторів в експлуатації «початковий» критерій ефективності  $D$  у конкретному випадку такий:

$$D = \frac{S}{C \cdot Q} \cdot K_{НАД} = \frac{S}{\left( \sum_{i=1}^5 C_i \right) \cdot Q} \cdot \prod_{j=1}^6 \left( 1 - \frac{\Delta N_j}{N} \right). \quad (7)$$

У загальному випадку цей критерій ефективності МТА має вигляд:

$$D = \frac{S}{\left( \sum_{i=1}^m C_i \right) \cdot Q} \cdot \prod_{j=1}^n \left( 1 - \frac{\Delta N_j}{N} \right), \quad (8)$$

де  $m$  і  $n$  можуть вибиратися залежно від пріоритетних чинників, що враховують характерні витрати ( $m$ -різновидів) і число характерних відмов ( $n$ -різновидів) [5].

Якщо  $T_0$  — кількість мотогодин, які трактор повинен відпрацювати протягом гарантійного терміну в ідеальному випадку без урахування відмов, то реальний час роботи трактора  $T_p$  з урахуванням відмов до закінчення гарантійного терміну логічно зв'язати з надійністю:

$$T_p = T_0 \cdot \prod_{j=1}^n \left( 1 - \frac{\Delta N_j}{N} \right) \quad (9)$$

Тоді ще зручнішим є модифікований критерій щодо фінансових витрат на одиницю оброблених гектарів:

$$D^* = \frac{e_H \cdot C_1 + \sum_{i=2}^m C_i + Q \cdot (S \cdot T_p) \cdot C_{1Л}}{S \cdot T_p}, \quad (10)$$

де  $e_H \cdot C_1$  — сума амортизаційних відрахувань за час  $T_0$ ;

$C_{1Л}$  — вартість 1-го літра палива.

Запишемо рівняння (1), (2) та співвідношення для потужності двигуна у вигляді:

$$[N - \Delta N_{ГОП}(B, e) - \Delta N_{МЕХ}(B, e)] \cdot (1 - \delta(B, e)) - [G \cdot f + P_{КР}^{uct}(B, v(B, e))] \cdot v(B, e) = 0; \quad (11)$$

$$m \cdot g \cdot (\alpha - \beta \cdot e^{-\lambda \delta}) - f_{ПЛ} \cdot G_{ПЛ}(B) - B \cdot h \cdot k \cdot \left( 1 + \frac{\varepsilon_0 \cdot v(B, e)^2}{k} \right) = 0; \quad (12)$$

$$M_{Д\omega Д} - N = 0. \quad (13)$$

Сконструємо на підставі рівнянь (11)–(13) безрозмірний квадратичний функціонал  $\Phi(e, \delta, B)$  як функцію трьох основних варійованих параметрів  $e, \delta$  і  $B$ :

$$\Phi(e, \delta, B) = \left\{ 1 - \frac{m \cdot g \cdot f \cdot v(B, e) + \left\{ f_{ПЛ} \cdot G_{ПЛ} + B \cdot h \cdot k \cdot \left( 1 + \frac{\varepsilon_0 \cdot v(B, e)^2}{k} \right) \right\} v(B, e)}{(M_{Д\omega Д} - \Delta N_{ГОП}(B, e) - \Delta N_{МЕХ}(B, e))(1 - \delta(B, e))} \right\}^2 + \left\{ 1 - \frac{m \cdot g(\alpha - \beta \cdot e^{-\lambda \delta})}{f_{ПЛ} \cdot G_{ПЛ} + B \cdot h \cdot k \left( 1 + \frac{\varepsilon_0 \cdot v(B, e)^2}{k} \right)} \right\}^2 + \left( 1 - \frac{N}{M_{Д\omega Д}} \right)^2. \quad (14)$$

Вочевидь, перша, друга і третя складові функціоналу в процесі його мінімізації будуть являти той факт, що за умов  $\Phi(e^*, \delta^*, B^*) = 0$  одночасно для трійки оптимальних параметрів  $e^*, \delta^*, B^*$  тотожно виконуються рівності (11)–(13). У цьому випадку в процесі оптимізації легко оцінити, наприклад, у відсотковому відношенні, похибку реального значення функціоналу  $\Phi(e, \delta, B)$  порівняно з його теоретичним мінімумом, рівним нулю. Отже, формально ставиться і розв'язується завдання умовної оптимізації

$$\min \Phi(e, \delta, B) = \Phi(e^*, \delta^*, B^*); \quad (15)$$

$$-1 \leq e \leq 1; \quad 0 \leq \delta \leq 0.35; \quad 0 \leq B \leq B_{\max}. \quad (16)$$

Така оптимізаційна постановка завдання відшукування взаємно однозначної відповідності між параметрами математичної моделі двопотокових ГОМТ і визначенням основних техніко-економічних показників ГОМТ і загальною трактора виявилася дуже зручною для комп'ютерної реалізації. Для певного параметра регулювання ГОП  $e (e \in [-1, +1])$  на робочому діапазоні в режимі оранки мінімум функціоналу (14) досягається або шляхом сканування за змінними  $\delta$  і  $B$ , або з використанням регулярних оптимізаційних процедур, наприклад, методів прямого пошуку Хука-Дживса, Нелдера-Міда, Пауелла, Розенброка або інших.

Таким чином, за повним або частковим завантаженням двигуна визначається повний спектр кінематичних, силових і енергетичних характеристик ГОМТ (включаючи ГОП і

механічну частину трансмісії), якому відповідає реальна швидкість оранки  $v$  ( $B, e$ ), що відповідає параметру регулювання ГОМТ  $e^*$  з урахуванням знайденого коефіцієнта буксування  $\delta^*$  і ширини захвату плуга  $B^*$ . Розраховується ККД ГОП  $\eta_{ГОП}$  і ККД ГОМТ  $\eta_{ГР}$ , ефективне крюкове навантаження  $P_{кр}$  і крюковий ККД  $\eta_{кр}$ , загальна сила тяги двигуна  $P_T$ , продуктивність трактора  $S$ , питома  $q$  і погектарна  $Q$  витрати палива, оцінки економічної ефективності трактора  $D$  або  $D^*$  (за заданими глибиною оранки  $h$  і коефіцієнтом  $k$ ). Зауважимо, що значення коефіцієнта буксування  $\delta^*$ , який є оптимальним з боку техніко-економічних показників не повинен перевищує екологічного обмеження в 15 %.

Вихідні дані для трактора ХТЗ-21021 з ГОМТ-1С, які використовуються в цій роботі в чисельному експерименті: маса  $m = 9000$  кг; двигун — Д260, номінальна потужність  $N = 147$  кВт за максимальною кутовою швидкістю колінчастого вала  $\omega_d = 220$  рад/с; задній міст, що містить головну передачу і бортовий редуктор, має передаточне відношення 1 : 20; радіус тягових коліс  $r = 0,803$  м; ГОП на базі об'ємних гідромашин ГСТ-112 з робочим об'ємом  $111 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>, розрахованих на максимальну потужність 135 кВт; коефіцієнт опору перекочуванню трактора  $f = 0,08$ , глибина оранки  $h = 0,25$  м, коефіцієнт питомого опору плуга  $k = 667,1$  кг/(м·с<sup>2</sup>);  $\alpha = 0,7$ ;  $\beta = 0,708$ ;  $\lambda = 7,4$ .

Для оцінювання економічної ефективності тракторів (ХТЗ-21021, ХТЗ-242К) з ГОМТ-1С у режимі «оранка» був впроваджений критерій витрат  $D^*$  (грн/га) по співвідношенню (10). При цьому прийнято:  $K_{НАД} = 0,85$ ;  $T_0 = 1000$  год.;  $T_p = 425$  год. — час роботи на оранці;  $e_H = 0,1$ ;  $C_1 = 1,5$  млн грн;  $C_5 = 45\ 000$  за час  $T_p$  — заробітна платня тракториста;  $C_{1л} = 25$  грн/л — ціна пального;  $K_{см} = 0,68$ .

Крім функціоналу  $\Phi = \Phi(e, \delta, B)$ , за співвідношенням (14) в програмну реалізацію алгоритму додатково введена контрольна функція нев'язки  $\xi$ , що дорівнює другому доданку в (14) та відповідає мінімальній квадратичній похибці крюкового навантаження для виконання рівнянь (1),(2).

Крім того, третій доданок у функціоналі (14) — функція нев'язки за потужністю двигуна  $N$  в квадраті — перетворюється в нуль за заданою максимальною експлуатаційною потужністю ДВС в 147 кВт.

В табл. 1 кожна пара стовпців відповідає конкретному тяговому режиму оранки і відповідає мінімальним значенням  $\Phi = \Phi(e^*, \delta^*, B^*)$  і  $\xi = \xi(e^*, \delta^*, B^*)$  для різних значень  $e, B$  і  $\delta$  за умов  $N$ , близького до 147 кВт (помилка менш 1%) .

Таблиця 1

Взаємозв'язки між основними техніко-економічними параметрами і економічною ефективністю трактора ХТЗ-21021 з ГОМТ-1С.

Техніко-економічний параметр	Одиниця виміру	Буксування, %					
		12 %	13 %	15 %	16 %	19 %	20 %
$\eta_{ГОП}$		0,656	0,657	0,539	0,540	0,340	0,341
$\eta_{ГР}$		0,808	0,809	0,799	0,799	0,783	0,783
$\Delta p$	МПа	22,04	21,97	24,49	24,41	27,01	26,90
$N_d$	МПа	148,4	147,9	148,0	147,5	147,1	146,6
$\Delta P$	кВт	31,2	31,0	33,8	33,7	42,2	42,0
$\Delta N_{ГОП}$	кВт	19,5	19,4	21,3	21,2	24,0	23,9
$V_t$	км/год.	9,53	9,53	8,44	8,44	7,53	7,53
$V$	км/год.	8,39	8,29	7,17	7,09	6,09	5,99
$P_{кр}$	Н	37334	37180	42366	42202	46312	46696
$\xi$	%	1,035	0,981	1,028	0,989	1,007	0,972
$S$	га/год.	1,14	1,13	1,17	1,16	1,16	1,14
$Q_{га}$	кг/га	19,46	19,61	18,92	19,07	18,98	19,21
$D^*$	грн/га	968,0	968,0	935,7	935,7	950,0	950,0
$\Phi$	%	0,0016	0,0008	0,0012	0,0005	0,0005	0,0012

		B=2 м	E=0,54	B=2,4 м	E=0,39	B=2,8 м	E=0,27
--	--	-------	--------	---------	--------	---------	--------

З табл. 1 випливає, що максимальні значення ККД ГОМТ  $\eta_{\text{ГТ}}$ , продуктивності  $S$  трактора і мінімальні значення сумарних втрат  $\Delta N_{\text{ГОП}}$  в ГОП, мінімум погектарної витрати палива  $Q$  а також мінімум показника втрат  $D^*$  забезпечує мінімум функціоналів  $\Phi = \Phi(e^*, \delta^*, B^*)$  і  $\xi = \xi(e^*, \delta^*, B^*)$ .

Таким чином, запропонований алгоритм вперше дозволяє встановити нові взаємозв'язки між основними техніко-економічними параметрами і оцінкою економічної ефективності  $D^*$  трактора в широкому діапазоні їх зміни з втратами в ГОП і ГОМТ-1С з урахуванням буксування колісного трактора в технологічному процесі оранки (і будь-якої іншої операції), визначити весь спектр кінематичних, силових, енергетичних характеристик ГОМТ та основні техніко-економічні показники загалом машинно-тракторного агрегату, оптимізувати ширину захвату плуга за критерієм максимального ККД ГОМТ  $\eta_{\text{ГТ}}$ , максимум значення продуктивності  $S$ , мінімум погектарної витрати палива  $Q$ , мінімум показника втрат  $D^*$  на обробку трактором 1 гектара площі.

Це відповідає єдиному, найраціональнішому тяговому режиму трактора з ГОМТ-1С, за умов  $B = 2,4$  м,  $e = 0,39$ ,  $V = 7,09-7,17$  км/год., крюкового навантаження  $P_{\text{КР}} = 42202$  Н і буксування  $\delta = 15-16$  %. Варто звернути увагу на те, що ці значення буксування ( $\delta = 15$  %) є обмеженням екологічного характеру під час обробки ґрунту колісними тракторами, а  $K_{\text{см}} = 0.68$ .

**Висновки. 1.** Розроблено інструментарій моделювання і прогнозування порівняльної оцінки економічної ефективності МТА (комплексної оцінка  $D^*$  у вимірі втрат гривня на гектар обробки площі) на основі алгоритму за визначенням основних техніко-економічних характеристик трактора із застосуванням безступінчастих гідрооб'ємно-механічних трансмісій типу ГОМТ-1С і ГОМТ-2С, розроблених для тракторів ХТЗ-21021 і ХТЗ-242К на кафедрі «Автомобіле- і тракторобудування» НТУ «ХПІ» для ПАТ «ХТЗ».

2. Вперше у форматі чисельного експерименту встановлено нові взаємозв'язки між основними техніко-економічними параметрами і оцінкою економічної ефективності  $D^*$  трактора з втратами в ГОП і ГОМТ з урахуванням буксування колісного трактора в технологічному процесі оранки. Визначено весь спектр кінематичних, силових, енергетичних характеристик ГОМТ, оптимізовано ширину захвату плуга за критерієм максимального ККД ГОМТ  $\eta_{\text{ГТ}}$ , знайдено максимум значення продуктивності  $S$ , мінімум погектарної витрати палива  $Q$ , мінімум показника втрат  $D^*$  на обробку трактором 1 гектара площі за умов екологічного обмеження щодо буксування ( $\delta = 15$  %).

3. Різні альтернативні конструкції ГОМТ для будь яких МТА об'єктивно можуть бути порівняні на підставі розробленого математичного інструментарію у процесі представленого чисельного експерименту. У результаті такого економіко-математичного моделювання і прогнозування ще на етапі проектування виникає обґрунтована оцінка найкращого типу і схемного рішення трансмісії, найкращого вибору співвідношень потужності двигуна і маси трактора за вказаними вище критеріями і екологічним обмеженням щодо буксування, найраціональніших співвідношень між конструктивними параметрами тракторів.

#### Література

1. Горячкин В. П. Собрание сочинений [Текст] : в 7-ми т. / В. П. Горячкин. — Москва : Сельхозгиз, 1940. — Т. 4. — 315 с.
2. Aitzetmüller H. Steyr S-Matic — The Future Continuously Variable Transmission for all Terrain Vehicles [Text] / H. Aitzetmüller // International Society for Terrain Vehicle Systems : 13th International Conference, Munich (Germany). — 1999. — P. 463–470.
3. Динамика транспортно-тяговых колесных и гусеничных машин [Текст] / Е. Е. Александров, Д. О. Волонцевич, В. А. Карпенко, А. Т. Лебедев, В. А. Перегон, В. Б. Самородов, А. Н. Туренко ; под ред. А. Н. Туренко. — Харьков : ХГАДТУ, 2001. — 642 с.
4. Renius K. Th. Continuously Variable Tractor Transmissions [Text] / Karl Th. Renius, Rainer Resch // Agricultural Equipment Technology Conference, 14–16 February 2005, Louisville, Kentucky, USA. — 35 p.
5. Годлевский М. Д. Развитие методики по определению основных технико-экономических показателей колесного трактора с бесступенчатой трансмиссией [Текст] / М. Д. Годлевский, Б. В. Самородов // Східно-європейський журнал передових технологій. — 2006. — № 6. — С. 27–30.

6. Самородов В. Б. Пространственно-топологические взаимосвязи производительности, рабочих скоростей, буксования, веса и мощности двигателя колесных тракторов [Текст] / В. Б. Самородов, А. А. Коваль // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 2008. — № 4. — С. 16—18.
7. Кравчук В. І. Алгоритм розвитку сільськогосподарського машинобудування на сучасному етапі [Текст] / В. І. Кравчук // Техніка і технології АПК. — 2012. — № 1. — С. 6—9.
8. Rossetti A. Multi-objective Optimization of Hydro-mechanical Power Split Transmissions [Text] / A. Rossetti, A. Macor // Mechanism and Machine Theory. — 2013. — № 62. — P. 112–128.
9. Pettersson K. Design Automation of Complex Hydromechanical Transmissions [Text] / K. Pettersson. — Linköping, 2013. — 85 p.
10. Кривоконь О. Г. Тракторобудування в Україні: передумови, історія, та тенденції розвитку в аспекті світового прогресу (20-ті—80-ті рр. XX сторіччя) [Текст] : монографія / О. Г. Кривоконь. — Харків : ПП «Технологічний Центр», 2015. — 672 с.
11. Samorodov V. B. The optimization algorithm in determining the relationship between technical and economic indices of machine-tractor unit with hydrovolumetric-mechanical transmission [Text] / V. B. Samorodov, M. B. Burlyga // European Cooperation. — 2016. — Vol. 3 (10). — P. 94—107.

Стаття рекомендована до друку 28.02.2019

© Самородов В. Б., Кривоконь О. Г.

#### References

1. Goriachkin, V. P. (1940). *Sobranie sochinenii: v 7-mi t.* Moskva. Selkhozgiz. T. 4.
2. Aitzetmüller, H. (1999). Steyr S-Matic — The Future Continuously Variable Transmission for all Terrain Vehicles. *International Society for Terrain Vehicle Systems: 13th International Conference, Munich (Germany)*, 463–470.
3. Aleksandrov, E. E., Volontsevich, D. O., Karpenko, V. A., Lebedev, A. T., Peregon, V. A., Samorodov, V. B., & Turenko, A. N. (2001). *Dinamika transportno-tiagovykh kolesnykh i gusenichnykh mashyn.* Kharkov: KhGADTU.
4. Renius, K. Th., & Resch, R. (2005). Continuously Variable Tractor Transmissions. *Agricultural Equipment Technology Conference, 14–16 February 2005.* Louisville, Kentucky, USA.
5. Godlevskii, M. D., & Samorodov, B. V. (2006). Razvitie metodiki po opredeleniiu osnovnykh tekhniko-ekonomicheskikh pokazatelei kolesnogo traktora s besstupenchatoi transmissiei. *Skhidno-yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, 6, 27–30.
6. Samorodov, B. V., & Koval, A. A. (2008). Prostranstvenno-topologicheskie vzaimosviasi proizvoditelnosti rabochikh skorostei, buksovaniia, vesa i moshchnosti dvigatel'ia kolesnykh traktorov. *Traktory i selkhozkhoziaistvennye mashyny*, 4, 16–18.
7. Kravchuk, V. I. (2012). Alhorytm rozvytku silskohospodarskoho mashynobuduvannia na suchasnomu etapi. *Tekhnika i tekhnolohii APK*, 1, 6–9.
8. Rossetti A., & Macor, A. (2013). Multi-objective Optimization of Hydro-mechanical Power Split Transmissions. *Mechanism and Machine Theory*, 62, 112–128.
9. Pettersson, K. (2013). *Design Automation of Complex Hydromechanical Transmissions.* Linköping.
10. Kryvokon, O. H. (2015). *Traktorobuduvannia v Ukraini: peredumovy, istoriia ta tendentsii rozvytku v aspekti svitovoho prohresu (20-ti—80-ti rr. XX storichchia).* Kharkiv: PP: «Teknologichnyi Tsentr».
11. Samorodov, V. B., & Burlyga, M. B. (2016). The optimization algorithm in determining the relationship between technical and economic indices of machine-tractor unit with hydrovolumetric-mechanical transmission. *European Cooperation*, 3(10), 94–107.

The article is recommended for printing 28.02.2019

© Samorodov V. B., Kryvokon O. G.