

О.Ю. РЕБРОВ, М.Є. ЯКУНІН

ІМІТАЦІЙНІ ВИПРОБУВАННЯ ТРАКТОРА ХТЗ-160У НА ОСНОВІ ПОЛЬОВИХ ЦИКЛІВ POWERMIX

В роботі наведені результати імітаційних тягово-динамічних випробувань перспективного універсального трактора ХТЗ-160У, отримані на основі польових випробувальних циклів PowerMix. Наведена методика визначення ККД трактора в агрегаті з сільськогосподарським знаряддям, яка будується на складових балансу потужності, отриманих при усередненні результатів розрахунків за польовими випробувальними циклами PowerMix. За результатами розрахунків показників наведеної продуктивності, погектарної витрати палива, ККД трактора в агрегаті з сільськогосподарським знаряддям та ймовірності виконання агроекологічних вимог на території України визначені найбільш перспективні варіанти комплектації шинами трактора ХТЗ-160У.

Ключові слова: трактор, PowerMix, тягово-динамічні випробування, продуктивність, витрата палива

А.Ю. РЕБРОВ, М.Е. ЯКУНИН

ИМИТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТРАКТОРА ХТЗ-160У НА ОСНОВЕ ПОЛЕВЫХ ЦИКЛОВ POWERMIX

В работе представлены результаты имитационных тягово-динамических испытаний перспективного универсального трактора ХТЗ-160У, полученные на основе полевых испытательных циклов PowerMix. Приведена методика определения КПД трактора в агрегате с сельскохозяйственным орудием, которая строится на составляющих баланса мощности, полученных при усреднении результатов расчетов по полевым испытательным циклам PowerMix. По результатам расчетов показателей приведенной производительности, погектарного расхода топлива, КПД трактора в агрегате с сельскохозяйственным орудием и вероятности выполнения агроэкологических требований на территории Украины определены наиболее перспективные варианты комплектации шинами трактора ХТЗ-160У.

Ключевые слова: трактор, PowerMix, тягово-динамические испытания, производительность, расход топлива

О. REBROV, M. YAKUNIN

SIMULATION TESTING OF THE KhTZ-160U TRACTOR BASED ON POWERMIX FIELD CYCLES

The paper presents the results of simulation traction-dynamic tests of the promising universal tractor KhTZ-160U, obtained on the basis of PowerMix field test cycles. A technique for determining the efficiency of a tractor in an aggregate with an agricultural implement is given, which is based on the components of the power balance obtained by averaging the results of calculations for PowerMix field test cycles. Based on the results of calculating the indicators of reduced productivity, per hectare fuel consumption, the efficiency of a tractor in an aggregate with an agricultural implement and the likelihood of meeting agro-ecological requirements on the territory of Ukraine, the most promising options for equipping tractor KhTZ-160U with tires were determined. It is shown that the KhTZ-160U tractor has the best indicators of efficiency and environmental friendliness on dual tires 420/85R34 GoodYear 142 (A8), which can also carry out inter-row tillage. The base tire 480/70R34 Voltyre 143 (A8) has the worst performance and cannot be recommended for implementation, as it meets agri-environmental requirements in only 18% of Ukraine. The 540/65R34 Mitas 148 (A8) has the highest performance rating and is therefore recommended as a base.

Keywords: tractor, PowerMix, traction and dynamic tests, performance, fuel consumption

Вступ. Ефективність використання сільськогосподарської техніки та, насамперед, колісних тракторів визначається не тільки економічністю двигуна а й показниками взаємодії колісного рушія із зовнішнім середовищем. Проблематика взаємодії тракторних шин із ґрунтовим середовищем містить дві складові. Перша з них визначає тягову ефективність шини, що полягає в досягненні високих значень дотичної сили тяги при низькому буксуванні або буксуванні, що не перевищує граничних значень для відповідної колісної ходової системи. Друга складова пов'язана з ущільнюючим впливом шини на ґрунт внаслідок нерівномірного

розподілу тиску в плямі контакту. Максимальний тиск колісного рушія на ґрунт також не повинен перевищувати гранично допустимих значень, які наведені в ДСТУ, та запобігають переущільненню та деградації ґрунтів внаслідок різних видів ерозії.

Таким чином, показники ефективності та екологічності колісного рушія тісно пов'язані та реалізуються внаслідок обґрунтованого вибору не тільки типорозміру шин, алей режимів їх функціонування, які визначаються радіальною навантагою та величиною внутрішнього тиску. Крім того, на тракторах, призначених для міжрядного обробітку, можлива комплектація здвоєними шинами для узгодження максимально можливої ширини профілю з рівнем допустимих навантаж на шину та забезпечення максимального тиску на ґрунт в межах допустимого. Оскільки комплекс сільськогосподарських операцій виконується у весняний та літньо-осінній періоди при різному стані ґрунту та ступені завантаження двигуна, для визначення показників ефективності та екологічності рушія перспективного трактора ХТЗ-160У при комплектуванні різними шинами пропонується в якості тестових навантаж на трактор скористатися процедурою PowerMix.

Аналіз останніх досягнень і публікацій.

Всі сільськогосподарські трактори проходять випробування відповідно до стандарту для офіційних випробувань сільськогосподарських і лісогосподарських тракторів Організації економічного співробітництва і розвитку (Organization for Economic Co-operation and Development, OECD). Процедура випробувань наведена в протоколі OECD Code 2 [1], яку використовують у випробувальних лабораторіях США (NTTL – Nebraska Tractor Test Laboratory, Небраска, США) [2] та Німеччини (DLG – Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft, Німецьке сільськогосподарське товариство) [3].

Різні польові технологічні процеси вимагають різної потужності сільськогосподарського трактора та мають споживачів енергії, які приводяться в дію за рахунок тягового зусилля, відбору потужності через вал відбору потужності (ВВП) та гідравлічну систему. Тільки на тягових технологічних процесах споживання енергії двигуна здійснюється за рахунок тягового зусилля, а в решті випадків – в комбінації. Іноді споживання енергії постійне, але, як правило, на практиці завжди переважають неоднорідні ґрунтові умови, ландшафт та циклічність технологічного процесу, що вимагає змінного в часі споживання енергії. Також в ряді технологічних процесів відбір механічної або гідравлічної потужності не є постійним, а змінюється з часом або робочим циклом [4]. Результатом є динамічна зміна режимів роботи двигуна, що призводить до змішаного споживання палива, яке відрізняється від статичних точок вимірювання, які застосовувались раніше [5]. З огляду на це в тесті DLG PowerMix використовується практична процедура тестування, яка також відповідає поточному стану сільськогосподарської техніки для тракторів.

Випробування в NTTL також проводяться при повному та частковому завантаженню двигуна, яке реалізується при тяговому зусиллі на гаку 50% і 75% від максимального [6]. Але випробування проводяться при сталому навантаженні без імітації динамічної складової тягового зусилля. Разом з цим слід відзначити, що існує відповідна методологія співвіднесення даних тестів NTTL OECD Code 2 і DLG PowerMix для розрахунку та аналізу споживання палива сільськогосподарськими тракторами [7].

Польові випробувальні цикли DLG PowerMix відповідають широкому переліку типових тягових і тягово-приводних технологічних операцій [8, 9], які здійснюються при повному та частковому завантаженні двигуна. Сукупність випробувальних польових циклів можна розглядати як модель експлуатації трактора [10], за якою можна порівнювати економічність двигуна [11], а також, при відповідному доопрацюванні, й ефективність роботи трактора при агрегуванні з комплексом машин.

Мета та постановка задачі.

Метою роботи є визначення показників ефективності та екологічності рушіїв перспективного колісного трактора ХТЗ-160У при комплектуванні різними шинами на основі імітаційної моделі тягово-динамічних випробувань за польовими випробувальними циклами PowerMix.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні завдання:

- розроблена методика визначення складових ККД трактора на основі усереднених за випробувальний цикл складових балансу потужності та показників наведеної до базового трактора продуктивності та витрати палива;
- визначені показники екологічності рушія за усередненими за випробувальний цикл значеннями максимального тиску на ґрунт та розробленого ймовірнісного критерію [12];
- проведений порівняльний аналіз показників ефективності та екологічності рушіїв трактора ХТЗ-160У при комплектуванні різними шинами.

Імітаційні випробування трактора ХТЗ-160У за польовими циклами PowerMix.

Дослідження були проведені для нового створюваного перспективного універсального трактора ХТЗ-160У компоновки 4К4б. За технічними даними виробника апроксимувалася сплайном зовнішня швидкісна характеристика двигуна. Для обраної вибірки будувалася модель тракторної сільськогосподарської шини [13], при цьому визначався необхідний внутрішній тиск в шинах, а також екологічність рушія трактора за максимальним тиском на ґрунт та ймовірнісним показником виконання агроекологічних вимог на території України [12].

Для шин трактора ХТЗ-160У був розглянутий комплекс обмежень:

- мінімальні посадкові діаметри передніх та задніх шин $D_{п1}$, $D_{п2}$ з компонувальних міркувань для розміщення колісних редукторів та гальм 24 дюйми;
- максимальні значення зовнішніх діаметрів передніх і задніх шин D_1 , D_2 , що забезпечують компоновку кабіни, мінімальний радіус повороту та статичну стійкість були прийняті в межах 1,6-1,7 м;
- за шириною профілю шин b_{k1} , b_{k2} вибір шин обмежувався величиною 600 мм;
- обмеження щодо допустимої радіальної навантаги $[Q_1]$, $[Q_2]$, яка повинна бути реалізованою при мінімально допустимому тиску p_{min} ;
- для здвоєних шин повинен бути достатній запас вантажопідйомності, щоб при від'єднанні зовнішніх шин забезпечити пересування трактора з транспортними швидкостями в транспортному габариті.

Оскільки експлуатаційна вага перспективного трактора становить 8,5 т, а розподіл ваги в статичному положенні (у %) 57/43, то наведеним вище обмеженням відповідають шини, наведені в табл. 1.

Для більш детального розгляду із вибірки з 24 шин обрані наступні шини: 13,6R38 Rosava; 420/85R34 GoodYear; 480/70R34 – базова одинарна шина; 540/65R30 Mitas; 540/65R34 Mitas; 600/70R30 Rosava. Такі шини обрані з наступних міркувань. Шина 13,6R38 Rosava – призначена для міжрядного обробітку, використовується виключно в здвоєній комплектації, перспективна для вирощування буряків. Шина 420/85R34 GoodYear – використовується тільки в здвоєній комплектації, передбачає міжрядний обробіток деяких культур, може використовуватися в якості преміум-комплектації трактора. Шина 480/70R34 Voltyre прийнята в якості базової, оскільки виробник трактора передбачав комплектацію трактора саме цією шиною за її технічними параметрами. Шини 540/65R30 Mitas та 540/65R34 Mitas – альтернативні шини для базової комплектації замість 480/70R34 Voltyre. Шина 600/70R30 Rosava – варіант базової шини для виконання робіт загального призначення, може замінити комплектацію здвоєними шинами 13,6R38 Rosava для міжрядного обробітку.

В якості зовнішнього навантаження трактора в даній роботі використовувались навантаги, що відповідають польовим випробувальним циклам PowerMix [6]. Оскільки протоколи випробувань DLG PowerMix містять інформацію саме про передану потужність, то ними

можна скористатися також для визначення тягових показників трактора не по бетонному треку, а по сільськогосподарському фоні, що й було зроблено в рамках даної роботи. Тому, практично на всіх циклах випробувань дійсна швидкість трактора за результатами моделювання нижча, внаслідок більш високого буксування шин на ґрунті, ніж на бетонному треку. Це помітно на енергоємних операціях циклів Z1P, Z1G, Z2P, Z2G, Z3K.

Таблиця 1 – Технічні дані вибірки шин для аналізу показників трактора ХТЗ-160У

Типорозмір	D, м	b, м	r _c , м	Q _{max} , кг	p _{ш. max} , МПа	Q _{min} , кг	p _{ш. min} , МПа	ІН	ІШ	Модель
Votyre										
16,9 R30	1,475	0,429	0,680	2300	0,16	1500	0,08	137	A8	VL-29
480/70 R30	1,478	0,479	0,666	2575	0,16	1685	0,06	141	A8	VL-44
18,4 R30	1,525	0,470	0,698	2650	0,16	1765	0,08	142	A8	ФВЛ-234
16,9 R34	1,575	0,429	0,727	2430	0,16	1600	0,08	139	A8	VL-26
480/70 R34	1,580	0,480	0,716	2725 ^{*1}	0,16	1780	0,06	143	A8	VL-44
480/70 R34x2*	1,580	0,480	0,716	2725	0,16	1780	0,06	143	A8	VL-44
18,4 R34	1,675	0,467	0,760	2800	0,16	1840	0,06	144	A8	VL-31
480/70 R38	1,680	0,480	0,766	2900	0,16	1715	0,06	145	A8	VL-44
Rosava										
21,3 R24	1,400	0,540	0,640	2500	0,16	1900	0,10	140	A6	УТР-14
13,6 R38x2	1,550	0,345	0,717	1800	0,16	1150	0,08	128	A8	TR-07
15,5 R38x2	1,570	0,394	0,725	2120	0,16	1420	0,08	134	A8	TR-07
600/70 R30	1,602	0,611	0,710	3550	0,16	2460	0,06	152	D	TR-106
23,1 R26	1,605	0,587	0,715	3650	0,16	2360	0,06	153	A8	Ф-37
16,9 R38x2	1,675	0,429	0,770	2575	0,16	1300	0,06	141	A8	TR-201
GoodYear										
480/70 R34	1,580	0,487	0,708	3000	0,16	1250	0,04	146	A8	D125M5
480/70 R34x2	1,580	0,487	0,708	3000	0,16	1250	0,04	146	A8	D125M5
420/85 R34**x2	1,582	0,442	0,709	3075	0,24	1215	0,04	147	A8	D067M4
Michelin										
480/70 R34	1,593	0,497	0,713	3130	0,16	1880	0,04	143	D	Omnibib
480/70 R34x2	1,593	0,497	0,713	3130	0,16	1880	0,04	143	D	Omnibib
480/70 R30x2	1,482	0,498	0,656	2690	0,16	1360	0,04	141	D	Omnibib
Petlas										
480/70 R34	1,580	0,478	0,712	2915	0,16	1900	0,06	143	A8	ТА 110/70
480/70 R34x2	1,580	0,478	0,712	2915	0,16	1900	0,06	143	A8	ТА 110/70
420/85 R34**x2	1,580	0,420	0,715	2835	0,16	1555	0,06	142	A8	ТА 110/85
Mitas										
540/65 R30	1,485	0,526	0,664	3855 ^{*2}	0,24	1940	0,06	153	A8	AC 65
540/65 R34	1,580	0,526	0,709	3335 ^{*3}	0,16	2055	0,06	148	A8	AC 65
Firestone										
540/65 R34	1,566	0,530	0,706	3335 ^{*4}	0,16	1945	0,06	152	D	Traction 65

* – x2 здвоєні шини; ** – 16,9 R34; ^{*1} – +40% (3815 кг) при 10 км/год і 0,16 МПа; ^{*2} – 5025 кг при 10 км/год і 0,30 МПа; ^{*3} – 4350 кг при 10 км/год і 0,20 МПа, 4060 кг при 10 км/год і 0,16 МПа; ^{*4} – 5325 кг при 10 км/год і 0,24 МПа.

Задовільна збіжність експериментальних даних та теоретичних розрахунків за циклами PowerMix при симуляції руху трактора по ґрунті [14] дозволяє стверджувати про доцільність використання заявленого математичного апарату.

При імітаційному моделюванні за циклами PowerMix може додатково бути отриманий цілий комплекс показників, що характеризують колісний трактор в агрегаті з відповідним сільськогосподарським знаряддям. Комплекс показників включає наступне.

ККД буксування ведучих мостів трактора:

$$\eta_{\delta i} = 1 - \delta_i. \quad (1)$$

ККД, що враховує опір коченню коліс ведучих мостів трактора:

$$\eta_{f i} = 1 - \frac{N_{f i}}{N_{o i}} = 1 - \frac{P_{f i}}{P_{o i}}. \quad (2)$$

ККД ходової системи трактора:

$$\eta_{xc} = \eta_{\delta 1} \cdot \eta_{f 1} \cdot \lambda_{k 1} + \eta_{\delta 2} \cdot \eta_{f 2} \cdot \lambda_{k 2}, \quad (3)$$

де $\lambda_{k 1}$, $\lambda_{k 2}$ – частки потужності на ведучих мостах трактора:

$$\lambda_{k 1} = \frac{P_{k 1} \cdot V_{\tau 1}}{P_{k 1} \cdot V_{\tau 1} + P_{k 2} \cdot V_{\tau 2}}; \quad \lambda_{k 2} = \frac{P_{k 2} \cdot V_{\tau 2}}{P_{k 1} \cdot V_{\tau 1} + P_{k 2} \cdot V_{\tau 2}}. \quad (4)$$

ККД трактора:

$$\eta_{trp} = \eta_{xc} \cdot \eta_{tr} \cdot \lambda_{tr} + \eta_{BVP} \cdot \lambda_{BVP} + \eta_{gd} \cdot \lambda_{gd}, \quad (5)$$

де λ_{tr} , λ_{BVP} , λ_{gd} , η_{BVP} , η_{gd} – частки потужності, що розподіляються від двигуна до трансмісії, редуктора ВВП, гідравлічної системи, ККД редукторної частини ВВП та гідравлічної системи відбору потужності.

$$\lambda_{BVP} = \frac{N_{BVP}}{N_k / \eta_{tr} + N_{BVP} + N_{gd}}; \quad \lambda_{tr} = \frac{N_k}{N_k / \eta_{tr} + N_{BVP} + N_{gd}}; \quad \lambda_{gd} = \frac{N_{gd}}{N_k / \eta_{tr} + N_{BVP} + N_{gd}}. \quad (6)$$

$$N_{BVP} = \frac{M_{BVP} \cdot \varepsilon_{\omega} \cdot \omega_{ном}}{u_{BVP}}; \quad N_k = P_{k 1} \cdot V_{\tau 1} + P_{k 2} \cdot V_{\tau 2}, \quad (7)$$

де M_{BVP} , u_{BVP} – крутний момент на хвостовику ВВП та передавальне число редуктора ВВП, відповідно.

ККД трактора з урахування ефективного ККД дизельного двигуна:

$$\eta_{trpe} = \eta_{trp} \cdot \eta_e, \quad (8)$$

де η_e – ефективний ККД дизельного двигуна.

$$\eta_e = \frac{3600}{H_u \cdot g_e}, \quad (9)$$

де H_u – нижча теплота згоряння дизельного палива.

Тестова процедура PowerMix передбачає 12 циклів випробувань трактора на польових технологічних операціях при змінному у часі зовнішньому навантаженні та складається з тягових циклів: оранки (Z1P, Z2P) та культивуації (Z1G, Z2G), тягово-приводних циклів з відбором потужності через вал відбору потужності (ВВП): фрезерування роторною фрезою (Z3K, Z4K, Z5K) і ворошіння сіна (Z3M, Z4M, Z5M), а також тягово-приводні цикли з відбором потужності через ВВП і гідравлічну систему трактора: розкидання гною (Z6MS) і тюкування сіна (Z7PR). Масштабування навантаги випробувальних циклів здійснюється відповідно до номінальної потужності тракторного двигуна.

Для порівняння тракторів з комплектацією різними шинами була застосована методика наведення отриманих за імітаційною моделлю тягово-динамічних показників до базового трактора на оранці, яка викладена в роботі [14]. В якості базового обраний трактор потужністю 100 кВт.

Аналіз результатів дослідження.

Імітаційне моделювання за польовими випробувальними циклами PowerMix відповідно до плану експерименту [14] дало змогу отримати широкий спектр даних щодо тягово-динамічних показників трактора ХТЗ-160У. Для аналізу визначались середні за випробувальний цикл показники. В якості прикладу в табл. 2 наведені середні за циклами культивуації (Z1G, навантага 100%), фрезерування роторною фрезою (Z3K, навантага 100%) та тюкування сіна (Z7PR,

навантага 100%) показники трактора ХТЗ-160У на здвоєних шинах 420/85R34 GoodYear 142 (А8). Отримані дані свідчать (табл. 2), що ККД трактора (машино-тракторного агрегату) з урахуванням ефективного ККД двигуна, продуктивність та погектарна витрата палива змінюються в широких межах.

Таблиця 2 – Середні за цикл показники трактора ХТЗ-160 на шинах 420/85R34

Показники	Z1G	Z3K	Z7PR
N_e – ефективна потужність двигуна, кВт	113,5	86,8	63,5
N_{pto} – потужність передана на ВВП, кВт	0	54,1	22,4
$N_{г}$ – потужність передана в гідравлічну систему відбору потужності, кВт	0	0	17,4
$N_{тр}$ – потужність втрачена в трансмісії, кВт	12,2	4,4	1,2
N_{k1} – потужність на колесах переднього моста, кВт	48,5	13,6	10,1
N_{k2} – потужність на колесах заднього моста, кВт	50,4	13,0	10,6
$N_{\delta 1}$ – потужність, витрачена на буксування коліс переднього моста, кВт	5,5	0,7	0,2
$N_{\delta 2}$ – потужність, витрачена на буксування коліс заднього моста, кВт	5,8	0,7	0,3
N_{o1} – потужність передана остову колесами переднього моста, кВт	43,0	12,9	9,9
N_{o2} – потужність передана остову колесами заднього моста, кВт	44,6	12,3	10,3
N_{f1} – потужність опору коченню коліс переднього моста, кВт	7,1	3,6	6,0
N_{f2} – потужність опору коченню коліс заднього моста, кВт	6,1	2,7	3,9
$N_{кр}$ – кривокова потужність трактора, кВт	74,4	18,9	10,4
M_e – ефективний момент двигуна, Нм	534,1	543,3	386,4
M_{pto} – еквівалентний крутний момент переданий на ВВП, Нм	0	345,6	140,2
$M_{г}$ – еквівалентний крутний момент переданий в гідравлічну систему, Нм	0	0	105,2
$M_{тр}$ – еквівалентний крутний момент втрат потужності в трансмісії, Нм	57,6	27,4	7,4
P_{k1} – дотична сила тяги на колесах переднього моста, кН	16,4	10,3	4,7
P_{k2} – дотична сила тяги на колесах заднього моста, кН	17,0	9,9	4,9
δ_1 – коефіцієнт буксування коліс переднього моста	0,11	0,05	0,02
δ_2 – коефіцієнт буксування коліс заднього моста	0,11	0,05	0,02
P_{o1} – сила передана остову трактора колесами переднього моста, кН	13,7	7,4	1,9
P_{o2} – сила передана остову трактора колесами заднього моста, кН	14,7	7,8	3,1
P_{f1} – сила опору коченню коліс переднього моста, кН	2,7	2,9	2,8
P_{f2} – сила опору коченню коліс заднього моста, кН	2,3	2,1	1,8
$P_{кр}$ – сила тяги на гаку трактора, кН	28,4	15,2	4,9
p_i – ймовірність виконання агроекологічних вимог трактором	0,859	0,840	0,819
$\eta_{трре}$ – ККД трактора з урахуванням ефективного ККД двигуна	0,25	0,191	0,110
η_e – ефективний ККД двигуна	0,377	0,400	0,377
η_{ptog} – ККД трактора з урахуванням потужності на ВВП і в гідр. системі	0,98	0,745	0,792
η_{pto} – ККД трактора з урахування потужності переданої на ВВП	0,98	0,745	0,797
$\eta_{тр}$ – ККД трансмісії трактора	0,89	0,858	0,946
$\eta_{\delta 1}$ – ККД, що враховує буксування коліс переднього моста	0,89	0,951	0,982
$\eta_{\delta 2}$ – ККД, що враховує буксування коліс заднього моста	0,89	0,948	0,976
η_{xc1} – ККД ходової системи переднього моста трактора	0,732	0,676	0,351
η_{xc2} – ККД ходової системи заднього моста трактора	0,761	0,739	0,594
η_{f1} – ККД опору коченню коліс переднього моста трактора	0,825	0,711	0,359
η_{f2} – ККД опору коченню коліс заднього моста трактора	0,857	0,780	0,609
$\eta_{кр}$ – кривоковий (тяговий) ККД трактора	0,665	0,607	0,451
g_{erow} – питома витрата палива за циклом PowerMix, г/(кВт·год)	260	227	234
g_e – ефективна питома витрата палива двигуном, г/(кВт·год)	227	211	223
G_t – погодинна витрата палива двигуном, кг/год	25,7	18,3	14,2
n – частота обертання колінчастого валу двигуна, хв ⁻¹	2035	1532	1578
ε_{ω} – ступінь завантаження двигуна за кутовою швидкістю	0,925	0,696	0,717
ε_M – ступінь завантаження двигуна за крутним моментом	0,985	1,001	0,712
ε_N – ступінь завантаження двигуна за потужністю	0,908	0,694	0,508
B – наведена ширина захвату сільськогосподарського агрегату, м	5,039	0,954	0,880

S – продуктивність трактора, га/год	4,805	0,432	0,672
V – дійсна швидкість руху трактора, км/год	9,5	4,5	7,64
W – погектарна витрата палива, кг/га	5,353	42,4	21,1
q_{max1} – максимальний тиск на ґрунт коліс переднього моста трактора, кПа	92	95	98
q_{max2} – максимальний тиск на ґрунт коліс заднього моста трактора, кПа	90	87	84
$k_{п1}$ – коефіцієнт навантаження шин переднього моста трактора, %	94	99	103
$k_{п2}$ – коефіцієнт навантаження шин заднього моста трактора, %	90	85	81
h_r – глибина колії після проходу трактора, м	0,043	0,043	0,038

При цьому слід зауважити, що середні за цикл показники визначались в межах часу циклу (рис. 1), який становить 250 секунд для циклів Z1P... Z5M та 500 секунд для циклів Z6MS і Z7PR. Тобто входження в цикл і вихід з нього при розрахунках до уваги не брались.

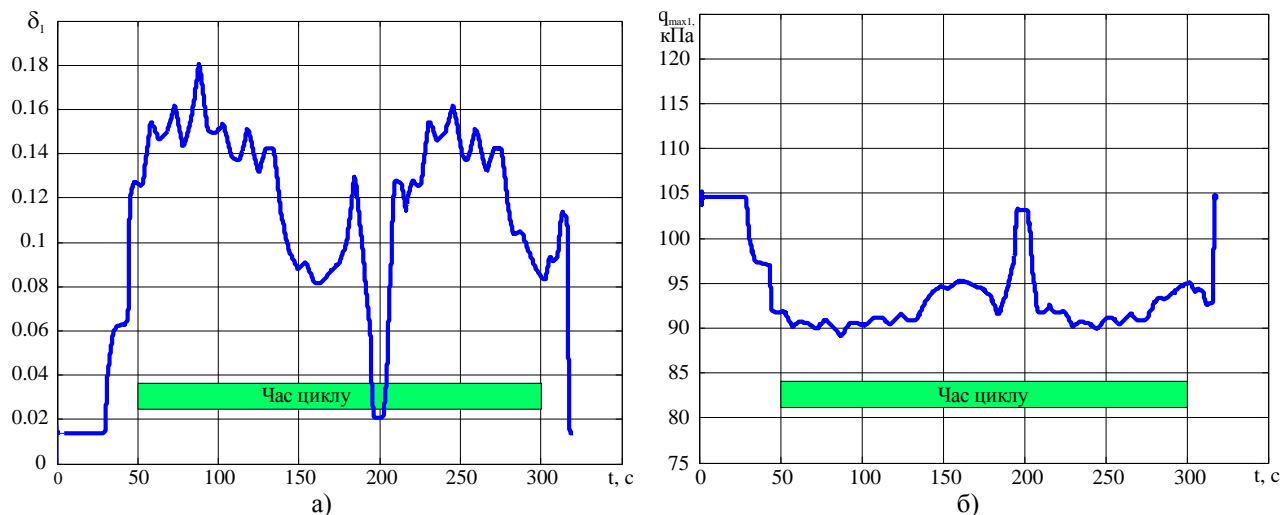


Рис. 1 – Показники трактора ХТЗ-160 на здвоєних шинах 420/85R34 GoodYear 142 (A8) на польовому циклі PowerMix Z1G (культивуація, навантага 100%):

а – коефіцієнт буксування шин переднього моста; б – максимальний тиск на ґрунт шин переднього моста

Наступним етапом проводилось наведення показників продуктивності, погектарної витрати палива, ймовірності виконання агроєкологічних вимог та інших за кожним випробувальним циклом та визначалось усереднене значення вказаних показників (рис. 2) з урахуванням частки кожної операції в річному обсязі робіт трактора [14].

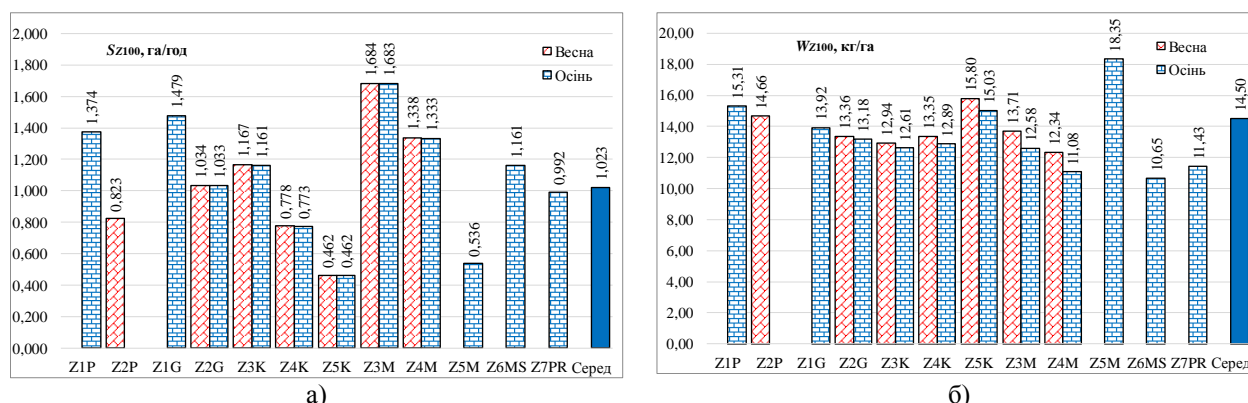


Рис. 2 – Наведені до базового трактора на оранці показники трактора ХТЗ-160У на здвоєних шинах 420/85R34 GoodYear 142 (A8) за польовими циклами PowerMix:

а – продуктивність; б – погектарна витрата палива

За визначеними усередненими показниками трактора проводився порівняльний аналіз ефективності комплектування різними шинами (рис. 3-4), який показав, що найбільшу

наведену продуктивність 1,047 га/год трактор має на шинах 540/65R34 Mitas 148 (A8). Це в середньому на 5% більше ніж на шинах 480/70R34 Voltyre 143 (A8), які виробником розглядались як базові. Разом з цим трактор на здвоєних шинах 420/85R34 GoodYear 142 (A8) має найкращу наведену паливну економічність, найвищий ККД та ймовірність виконання агроекологічних вимог на території України, яка сягає 0,68. Тобто трактор на цих шинах може експлуатуватись на 68% території України без порушення агроекологічних вимог в літньо-осінній та весняний періоди.

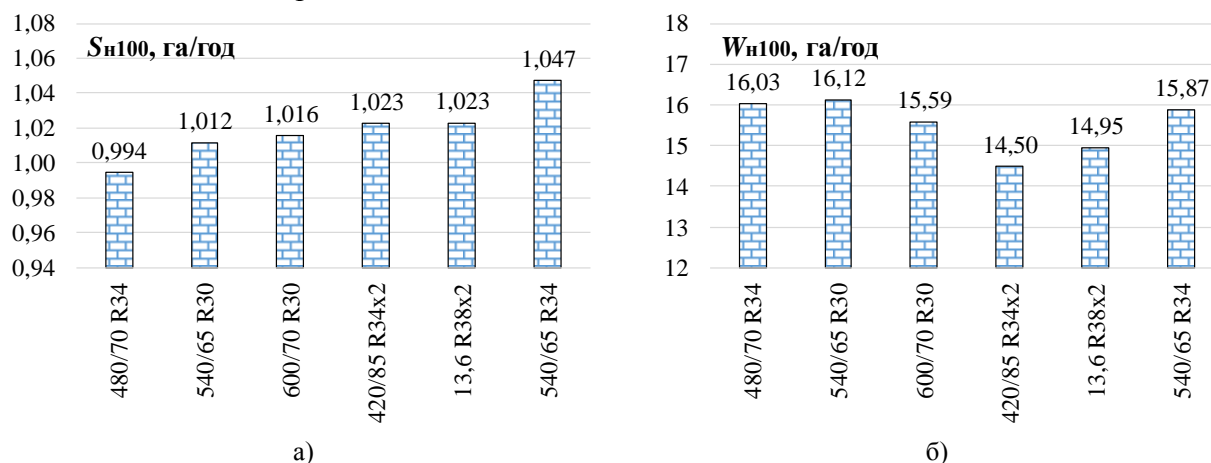


Рис. 3 – Наведені до базового трактора на оранці показники трактора ХТЗ-160У на різних шинах при імітаційних випробуваннях за польовими циклами PowerMix:
а – продуктивність; б – погектарна витрата палива

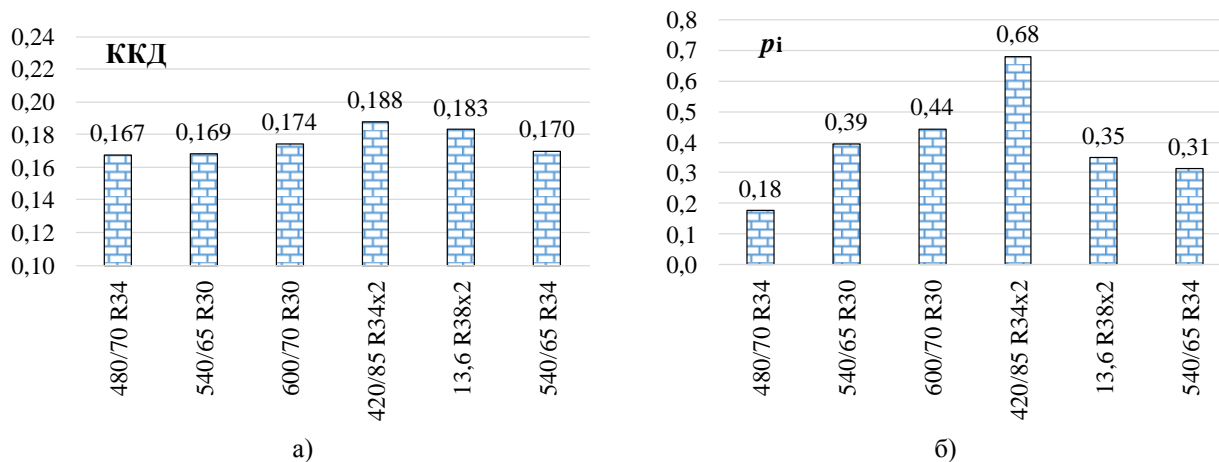


Рис. 4 – Показники трактора ХТЗ-160У на різних шинах при імітаційних випробуваннях за польовими циклами PowerMix:
а – ККД трактора; б – ймовірність виконання агроекологічних вимог

Найгірші показники має трактор на базових шинах 480/70R34 Voltyre 143 (A8), що підтверджує думку про необхідність ретельного обґрунтування вибору типорозмірів шин для конкретних конструкцій тракторів.

Висновки.

Застосована розроблена методика визначення складових ККД трактора на основі усереднених за випробувальний цикл складових балансу потужності та показників наведеної до базового трактора продуктивності та витрати палива дала змогу порівняти різні варіанти комплектування трактора ХТЗ-160У шинами.

Визначені показники екологічності рушія за усередненими за випробувальний цикл

значеннями максимального тиску на ґрунт та розробленого ймовірнісного критерію дали змогу додати їх до бази порівняння різних комплектацій трактора ХТЗ-160У шинами.

Проведений порівняльний аналіз показників ефективності та екологічності рушіїв трактора ХТЗ-160У при комплектуванні різними шинами на основі комплексу тягово-динамічних показників, отриманих за польовими випробувальними циклами PowerMix показав наступне. Ні одна з шин повністю не задовольняє агроекологічним вимогам щодо максимального тиску на ґрунт на всій території України, що обумовлює необхідність використання гусеничних тракторів не весняно-польових роботах. Найкращі показники ефективності та екологічності рушія трактор ХТЗ-160У має на здвоєних шинах 420/85R34 GoodYear 142 (A8), який може також здійснювати міжрядний обробіток рослин. Базова шина 480/70R34 Voltyre 143 (A8) має найгірші показники ефективності та не може бути рекомендована для впровадження, оскільки задовольняє агроекологічним вимогам тільки на 18% території України. Шина 540/65R34 Mitas 148 (A8) має найвищий показник наведеної продуктивності, тому рекомендована в якості базової. Вона встановлена виробником на перші дослідні зразки трактора ХТЗ-160У, який проходить випробування. Решта шин має близькі показники, тому вони рекомендовані для комплектації трактора ХТЗ-160У при роботі за відповідним призначенням.

Список літератури

1. OECD standard code for the official testing of agricultural and forestry tractor performance. CODE 2. February 2019. URL: <https://www.oecd.org/agriculture/tractors/codes/02-oecd-tractor-codes-code-02.pdf>
2. Test reports // Nebraska tractor test laboratory. – Access mode: <https://tractortestlab.unl.edu/testreports/>. – Date of the application: 25.11.2021.
3. DLG Test Report database [Electronic resource] // DLG Agriculture. – Access mode: <https://www.dlg.org/en/agriculture/tests/query-for-test-reports/>. – Date of the application: 25.11.2021.
4. Degrell O., Feuerstein T.: DLG-PowerMix – Ein praxisorientierter Traktorentest, [Online]: http://www.tec.wzw.tum.de/studium/power_mix. – Date of the application: 25.11.2021.
5. Potentialanalyse bedarfsgerecht betriebener Nebenaggregate an einem Off-Highway-Motor: Dissertation. Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Ingenieurwissenschaften / Stefan Berlenz. – Karlsruhe, 2015. – 137 s.
6. Predicting tractor diesel fuel consumption / R. Grisso, J. Perumrpal, D. Vaughan [et al.] // *Virginia Cooperative Extension (VCE)*. – Publ. 442-073.
7. Sendhilkumar M., Faiyazi J., Seibold F., Apostolov H. (2018) Methodology for Correlating OECD and DLG PowerMix Test Data to Calculate and Analyze Area-related Fuel Consumption of Agricultural Tractors and Incorporate Life Cycle Assessment. In: Berns K. et al. (eds) Commercial Vehicle Technology 2018. Proceedings. Springer Vieweg, Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-21300-8_17.
8. Andersen J. Methods to calculate and declare fuel consumption for heavy non road mobile machinery / J. Andersen, S. Åberg, L. Erlandsson // A report for the Swedish road administration. – 2010. – P. 55.
9. Mathematical model of diesel engine characteristics for determining the performance of traction dynamics of wheel-type tractor / O. Rebrov, A. Kozhusko, B. Kalchenko, A. Mamontov, A. Zakovorotniy, E. Kalinin, E. Holovina // *EUREKA: Physics and Engineering*. – 2020. – № 4. – P. 90–100. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001352>.
10. Tritschler P. Optimisation de l'architecture électrique et gestion d'énergie pour un système à pile à combustible embarquée dédiée à l'application agricole. Sciences de l'ingénieur [physics] / P. Tritschler // Université de Grenoble, 2010. Français. – P. 126.
11. Парсаданов І. В. Підвищення якості і конкурентоспроможності дизелів на основі комплексного паливно-екологічного критерію: монографія / Парсаданов І. В. – Харків: НТУ «ХПІ», 2003. – 244 с. – Рос. мовою.
12. Ребров О.Ю. Розподіл допустимого тиску на ґрунт ходових систем колісних тракторів за територією України / О.Ю. Ребров // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Сер. Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 27 (1303). – С. 110–116.
13. Вибір параметрів шин сільськогосподарських тракторів: монографія / О. Ю. Ребров. – Харків. Видавець: О. А. Мірошніченко, 2021. – 304 с. іл.
14. Наукове обґрунтування підвищення ефективності колісних рушіїв сільськогосподарських тракторів на енергоємних технологічних операціях обробітку ґрунту: дис. ... д-р техн. наук: 05.22.02 / Ребров Олексій Юрійович. – Харків, 2021. – 423 с.

References (transliterated)

1. OECD standard code for the official testing of agricultural and forestry tractor performance. CODE 2. February 2019. URL: <https://www.oecd.org/agriculture/tractors/codes/02-oecd-tractor-codes-code-02.pdf>
2. Test reports // Nebraska tractor test laboratory. – Access mode: <https://tractortestlab.unl.edu/testreports/>. – Date of the application: 25.11.2021.
3. DLG Test Report database [Electronic resource] // DLG Agriculture. – Access mode: <https://www.dlg.org/en/agriculture/tests/query-for-test-reports/>. – Date of the application: 25.11.2021.
4. Degrell O., Feuerstein T.: DLG-PowerMix – Ein praxisorientierter Traktorentest, [Online]: http://www.tec.wzw.tum.de/studium/power_mix. – Date of the application: 25.11.2021.
5. Potentialanalyse bedarfsgerecht betriebener Nebenaggregate an einem Off-Highway-Motor: Dissertation. Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Ingenieurwissenschaften / Stefan Berlenz. – Karlsruhe, 2015. – 137 s.
6. Predicting tractor diesel fuel consumption / R. Grisso, J. Perumpral, D. Vaughan [et al.] // *Virginia Cooperative Extension (VCE)*. – Publ. 442-073.
7. Sendhilkumar M., Faiyazi J., Seibold F., Apostolov H. (2018) Methodology for Correlating OECD and DLG PowerMix Test Data to Calculate and Analyze Area-related Fuel Consumption of Agricultural Tractors and Incorporate Life Cycle Assessment. In: Berns K. et al. (eds) *Commercial Vehicle Technology 2018. Proceedings*. Springer Vieweg, Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-21300-8_17.
8. Andersen J. Methods to calculate and declare fuel consumption for heavy non road mobile machinery / J. Andersen, S. Åberg, L. Erlandsson // *A report for the Swedish road administration*. – 2010. – P. 55.
9. Mathematical model of diesel engine characteristics for determining the performance of traction dynamics of wheel-type tractor / O. Rebrov, A. Kozhusko, B. Kalchenko, A. Mamontov, A. Zakovorotniy, E. Kalinin, E. Holovina // *EUREKA: Physics and Engineering*. – 2020. – № 4. – P. 90–100. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001352>.
10. Tritschler P. Optimisation de l'architecture électrique et gestion d'énergie pour un système à pile à combustible embarquée dédiée à l'application agricole. Sciences de l'ingénieur [physics] / P. Tritschler // Université de Grenoble, 2010. Français. – P. 126.
11. Parsadanov I. V. Pidvyshchennia yakosti i konkurentospromozhnosti dyzeliv na osnovi kompleksnoho palyvno-ekolohichnoho kryteriiu: monohrafiia [Improving the quality and competitiveness of diesels based on a comprehensive fuel and environmental criterion: a monograph] / Parsadanov I. V. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2003.
12. Rebrov O.Iu. Rozpodil dopustymoho tysku na grunt khodovykh system kolisnykh traktoriv za terytoriiu Ukrainy [Distribution of admissible pressure on the ground of running systems of wheeled tractors on the territory of Ukraine] / O.Iu. Rebrov // *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Ser. Matematychni modeliuvannia v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. – Kharkiv: NTU «KhPI» [Bulletin of the National Technical University "KhPI": Mathematical modeling in engineering and technology]. – 2018. – № 27 (1303). – S. 110–116.
13. Vybir parametriv shyn silskohospodarskykh traktoriv: monohrafiia [Choice of parameters of agricultural tractors tires: monograph] / O.Yu. Rebrov. – Kharkiv. Vydavets: O.A. Miroshnychenko, 2021. – 304 c. il.
14. Naukove obgruntuvannia pidvyshchennia efektyvnosti kolisnykh rushiiv silskohospodarskykh traktoriv na enerhoiemnykh tekhnolohichnykh operatsiiah obrobitku gruntu [Scientific substantiation of increasing of wheeled agricultural tractor's propulsors efficiency on energy intensive technological operations of soil tillage. – Manuscript]: dys. ... d-r tekhn. nauk: 05.22.02 / Rebrov Oleksii Yuriiiovych. – Kharkiv, 2021. – 423 s.

Надійшла (received) 10.12.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ребров Олексій Юрійович (Ребров Алексей Юрьевич, Rebrov Oleksii Yuriyovich) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри автомобіле- і тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1312-9992>; e-mail: alexrebrov0108@gmail.com

Якунін Максим Євгенович (Якунин Максим Евгеньевич, Yakunin Maksym Yevgenovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри автомобіле- і тракторобудування, м. Харків, Україна; e-mail: yakunin_maksim92@ukr.net