

ВПЛИВ РОЗПОДІЛУ ВАГИ НА ВІСІ МІНІТРАКТОРА НА ЙОГО ТЯГОВІ ПОКАЗНИКИ ЗА ІМІТАЦІЙНИМИ ЦИКЛАМИ POWERMIX

Ткачов В'ячеслав Юрійович

старший викладач

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

ORCID: 0000-0003-4619-5758

engineer.viacheslav@gmail.com

Кожушко Андрій Павлович

доктор технічних наук, доцент

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

ORCID: 0000-0002-4725-5911

Andreykozhusko7@gmail.com

В умовах погіршення навколишнього середовища викидами та зменшенням запасів викопного палива в різних промислових галузях перспективним шляхом є переведення засобів на альтернативну чисту енергію. Такий розвиток спонукає до модернізації не тільки автомобільної, а й іншої спеціалізованої техніки, зокрема, колісних тракторів. В сільському господарстві використовуються трактори різних тягових класів для виконання тягових і транспортних робіт. Актуальним на сьогоднішній день є впровадження електроприводу на трактори малих тягових класів, які призначені для міжрядної обробки просапних культур, оранки легких ґрунтів в садах і теплицях, для роботи з косаркою, а також для дрібних транспортних робіт. Таке впровадження реалізується заміною двигуна внутрішнього згорання на електричний привід, у зв'язку з цим виникає задача дотримання тягових властивостей трактора. Тому матеріал даної статті має за мету чисельний аналіз впливу розподілу ваги мінітрактора на його тягово-енергетичні показники. Реалізація окресленої мети відбувається за рахунок імітаційного чисельного експерименту тягових випробувальних циклів. При вирішенні поставленої мети використовується методика динамічних випробувань Німецького сільськогосподарського товариства DLG-PowerMix, яка налічує 12 етапів випробувань сільськогосподарського трактора на польових операціях при варіюваному зовнішньому навантаженні. Результатом є обґрунтований підбір умовного розподілу загальної ваги мінітрактора з дотриманням максимальних середніх значень швидкості руху і ККД трактора, а також мінімального середнього значення буксування, як тих що доцільно впроваджувати в електротрактор. Практична значимість роботи полягає у наданні конкретних значень розподілу ваги на вісі мінітрактора при агрегуванні плугом, культиватором, роторною фрезою та сінокосаркою, а також з урахуванням роботи машини для розкидання ґною та машини для тюкування сіна. Науковою новизною роботи є встановлення взаємозв'язку між конструктивними параметрами мінітрактора та зміною тягово-енергетичних показників в ході виконання технологічних робіт, а саме між розподілом ваги трактора та швидкістю, ККД трактора та буксуванням коліс.

Ключові слова: трактор, тягово-енергетичні показники, польова операція, розподіл ваги, випробувальні цикли, PowerMix, імітаційне моделювання.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.4.9>

Вступ. Упродовж останнього десятиліття у світі великого розповсюдження набула електрифікація транспортних засобів, як автомобілів, так і тракторів. Це, передусім, покликано вирішити проблеми погіршення навколишнього середовища забруднюючими викидами та зменшенням запасів викопного палива. З аналізу сучасного стану впровадження електричних силових установок на трактори і сільськогосподарські машини (Moreda et al., 2016) доведено, що використання електричних приводів призводить до підвищення енергоефективності, а також забезпеченням універсальності сільськогосподарської діяльності. Більшість виробників тракторів сільськогосподарського призначення представили свої концепти на виключно електричній та/або гібридній силовій установці (Kozhushko et al., 2022): Fendt e100 Vario; John Deere Joker; Kramer 5055e; Escorts Farmtrac 26E; Case ProHybrid EECVT; JCB 525-60e; Multi Tool Trac; XT3-2511E; Kolos-244, тощо.

Більшість з виробників тракторної техніки (Danylenko et al., 2023) впроваджують електричний привід на малопотужні мінітрактори, що, на їх думку, повинно надати стрімкого розвитку фермерського господарства. Використання малопотужних мінітракторів обумовлено їх універсальністю (Danylenko et al., 2023), адже використовуються у комплексі зі змінними навісними, напівнавісними та причіпними сільськогосподарськими агрегатами (рис. 1), тому конструкція електротрактора повинна враховувати роботу валу відбору потужності. Така універсальність мінітракторів повинна забезпечувати реалізацію тягових та енергетичних показників.

З роботи (Gade & Wahab, 2023) відомо, що найбільш простою та розповсюдженою є конструкційна схема силової установки електротрактора, яка передбачає заміну двигуна внутрішнього згорання на електричний привід. Така схема, на думку (Liu et al., 2016), не вимагає поглиблених конструкційних рішень, але еквівалентно замінити масову складову двигуна



Рис. 1. Роботи сільськогосподарського призначення, які реалізує мінітрактор ХТЗ-2511

внутрішнього згоряння – складно, що вимагає аналізу розподілу ваги по осях мінітрактора на тягового-енергетичні показники. Проведення комплексної оцінки тягового-енергетичних показників трактора доцільно проводити у складі тягових та тягово-привідних машинно-тракторних агрегатів (Lebedev et al., 2004). Таку ж концепцію пропонують закордоном, де запропоновано методику тягово-динамічних випробувань Німецького сільськогосподарського товариства (DLG, Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft), яке публікує результати випробувань тракторів за процедурою PowerMix (DLG, 2023; Rebrov et al., 2020).

Виходячи з вищевикладеного, метою даного дослідження є оцінка впливу розподілу ваги мінітрактора (типу ХТЗ-2511) на тягово-енергетичні показники за рахунок використання імітаційних випробувальних циклів PowerMix.

Матеріали і методи досліджень. Визначення тягово-енергетичних показників трактора (розрахункова схема наведена на рис. 2) ґрунтується на обчисленні системи диференціальних рівнянь (Kalchenko et al., 2021).

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{X} + P_{kr} = 2(P_{o1} + P_{o2}); \\ m \cdot (\ddot{Z} + g) + P_{krz} = 2(G_{k1} + G_{k2}); \\ \frac{J_o \cdot \ddot{\varphi}_o}{2} + G_{k1}(X_{o1} - X) + G_{k2}(X_{o2} - X) = \\ = \frac{P_{krz}}{2}(X_{o3} - X) - P_{o1}(Z_{o1} - Z) + P_{o2}(Z_{o2} - Z) + \frac{P_{kr}}{2}(Z_{o3} - Z), \end{cases} \quad (1)$$

де X, Z, φ_o – узагальнені координати; P_{o1}, P_{o2} – сили, що штовхають остов трактора вперед; G_{k1}, G_{k2} – радіальні навантаги на шини; P_{kr}, P_{krz} – горизонтальна та вертикальна складові сили тяги на гаку; $x_{o1}, x_{o2}, x_{o3}, z_{o1}, z_{o2}, z_{o3}$ – горизонтальні і вертикальні координати точок остова трактора у обраній системі відліку.

Для реалізації системи диференціальних рівнянь (1) необхідно встановити взаємозв'язки між координатами точок остова трактора та узагальненими координатами

$$\begin{cases} X_{oi} = X - \rho \cdot \cos(\varphi_o + \lambda_{oi}); \\ Z_{oi} = Z + \rho \cdot \sin(\varphi_o + \lambda_{oi}), \end{cases} \quad (2)$$

де ρ, λ_{oi} – радіуси-вектори і кути точок остова трактора у полярній системі координат з центром в точці O .

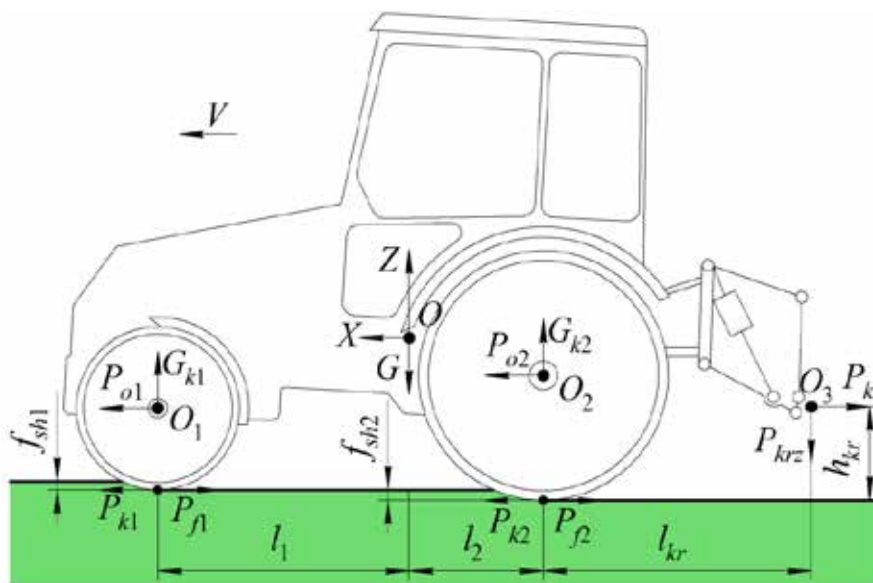


Рис. 2. Розрахункова схема трактора

Таким чином радіальний прогин шин визначається наступним чином:

$$\begin{aligned} f_{sh1} &= D_1/2 + Z_{G1} - Z_{o1}; \\ f_{sh2} &= D_2/2 + Z_{G2} - Z_{o2}, \end{aligned} \quad (3)$$

де D_1, D_2 – зовнішній діаметр шини; Z_{G1}, Z_{G2} – вертикальні координати рівня ґрунту, які у загальному випадку є випадковими функціями пройденого шляху. Визначення пружних характеристик шин трактора ХТЗ-2511 з типорозмірами 7,5R16 та 9,5R32 базувались на роботі (Rebrov, 2015).

Для визначення сил P_{oi} , що штовхають остов трактора вперед необхідно знати дотичні сили тяги P_{ki} та сили опору коченню P_{fi} на кожному колесі:

$$P_{oi} = P_{ki} - P_{fi}. \quad (4)$$

Сила опору коченню P_{fi} визначається, у тому числі, за величиною пресування ґрунту h_{gi} або глибини колії після N -го проходу колеса:

$$P_{fi} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{0,81 \cdot k_0 \cdot k_N}{100 \cdot \sqrt{a_k \cdot b_k}} \cdot b_{ki} \cdot h_{ri}^2 \right). \quad (5)$$

де k_0, k_N – коефіцієнт об'ємного зминання ґрунту (Panov & Vetokhyn, 2008) та коефіцієнт, що враховує зміну фізико-механічних властивостей ґрунту, який для перших чотирьох проходів N можна визначити з достовірністю $R^2 = 0,999$; a_{kr}, b_{ki} – довжина і ширина плями контакту i -тої шини з ґрунтом; h_{ri} – деформації ґрунту (Rebrov, 2021) під кожним i -тим колесом трактора визначається за формулою:

$$h_{ri} = \sqrt[3]{\frac{G_{ki}^2}{\left(\frac{k_0 \cdot k_N}{100 \cdot \sqrt{a_k \cdot b_k}} \right)^2 \cdot b_{ki}^2 \cdot D_i \cdot \left(1 + \frac{f_{ши}}{h_r} \right)}}. \quad (6)$$

Визначення радіальних навантажень на колеса трактора відбувається наступним чином

$$G_{k1} = G \frac{l_2}{2L} - \left(P_{k1} - G \cdot f \cdot \frac{l_2}{L} \right) \cdot \frac{h_{kr}}{2L} \quad (7)$$

$$G_{k2} = G \frac{l_1}{2L} - \left(P_{k2} - G \cdot f \cdot \frac{l_1}{L} \right) \cdot \frac{h_{kr}}{2L} \quad (8)$$

де L – поздовжня база трактора; l_1 та l_2 – відстань від центра тягіння до осей переднього та заднього мостів;

f – коефіцієнт опору кочення коліс; h_{kr} – висота точки дії сили тяги на гаку від опорної поверхні.

Єдиною невідомою величиною є буксування коліс трактора, яке визначається відомою залежністю дійсної та теоретичною швидкостей. Підсумовуючи вище зазначене та врахування зміни коефіцієнтів буксування стає можливим визначення дотичної сили тяги переднього колеса P_{k1} та заднього ведучого P_{k2} .

$$P_{k1} = (C_c \cdot F_k + G \cdot \operatorname{tg} \varphi_c); \quad (9)$$

$$P_{k2} = (C_c \cdot F_k + G \cdot \operatorname{tg} \varphi_c) \cdot \left\{ 1 - \frac{k_c \cdot (1 - \delta_2)}{a_k \cdot \delta_2} \cdot \left[1 - e^{-\frac{a_k \cdot \delta_2}{k_c \cdot (1 - \delta_2)}} \right] \right\}, \quad (10)$$

де C_c – напруга зсуву в ґрунті; φ_c – кут внутрішнього тертя в ґрунті; k_c – коефіцієнт деформації в ґрунті.

Процедура випробувальних циклів PowerMix складається з 12 етапів випробувань сільськогосподарського трактора на польових операціях при варіюваному зовнішньому навантаженні: оранки та культивуації, тягово-приводних циклів з відбором потужності через вал відбору потужності (ВВП): фрезерування роторною фрезою і ворошіння сіна, а також тягово-приводні цикли з відбором потужності через ВВП і гідравлічну систему трактора: розкидання гною і тюкування сіна (табл. 1).

Загальний вигляд циклів навантаження наведемо на рис. 3. Окреслені цикли зміни зовнішніх навантажень запропоновані як тестові процедури при обчисленні тягової ефективності тракторів.

Таким чином, представленні базові складові для визначення впливу розподілу ваги мінітрактора на тягово-енергетичні показники. Згідно з табл. 1 найбільші навантаження трактор сприймає на тягових роботах: оранка (Z1P і Z2P) та культивуація (Z1G і Z2G).

Результати. В ході імітаційного моделювання приймалися вихідні дані, які рекомендуються заводом-виробником (KhTZ-2511, 2005): маса – 2200 кг; тиск в передніх шинах 7,5R16 – 200 кПа; тиск в задніх шинах 9,5R32 – 80 кПа; поздовжня база – 1,837 м; агрофон – стерня колосових (Panov & Vetokhyn, 2008), тощо.

Таблиця 1

Цикли PowerMix для польових операцій (Rebrov et al., 2020)

Тип роботи	Цикл	Навантага, %	$n_{\text{ВВП}}$, хв ⁻¹	Умови проведення
Тягова	Оранка Z1P	100	–	Зниження середньої швидкості не більше 2,5 км/год (окрім циклу Z1P, якщо трактор не може розвинути більшу тягову потужність).
	Оранка Z2P	60	–	
	Культивуація Z1G	100	–	
	Культивуація Z2G	60	–	
Тяговоприводна	Фрезерування Z3K	100	900	Зниження середньої швидкості не більше 2,5 км/год та середньої частоти обертання хвостовика ВВП не більше 7,5 %.
	Фрезерування Z4K	70	900	
	Фрезерування Z5K	40	900	
	Ворошіння Z3M	100	900	
	Ворошіння Z4M	70	900	
	Ворошіння Z5M	40	900	
Тягово-приводна, гідравлічна	Розкидання гною Z6MS	100	1000	
	Тюкування сіна Z7PR	100	1000	

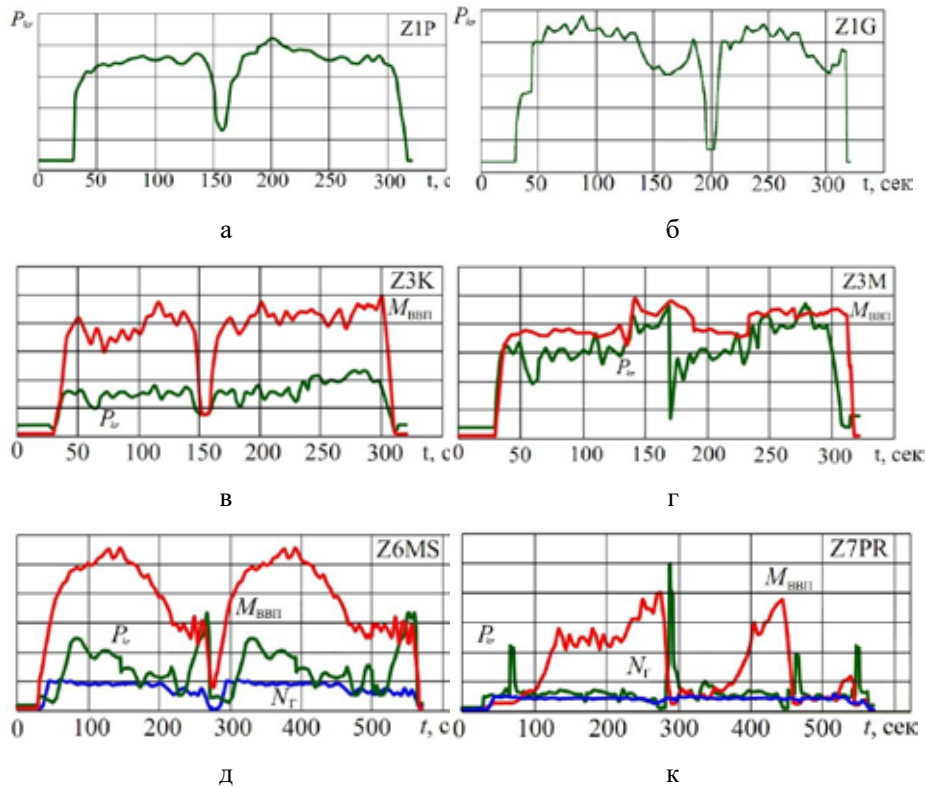


Рис. 3. Цикли PowerMix для імітації польових операцій:

а – агрегування плугом Z1P, Z2P; б – агрегування культиватором Z1G, Z2G; в – агрегування роторною фрезею Z3K, Z4K, Z5K; г – агрегування сінокосаркою Z3M, Z4M, Z5M; д – машина для розкидання гною Z6MS; к – машина для тюкування сіна Z7PR

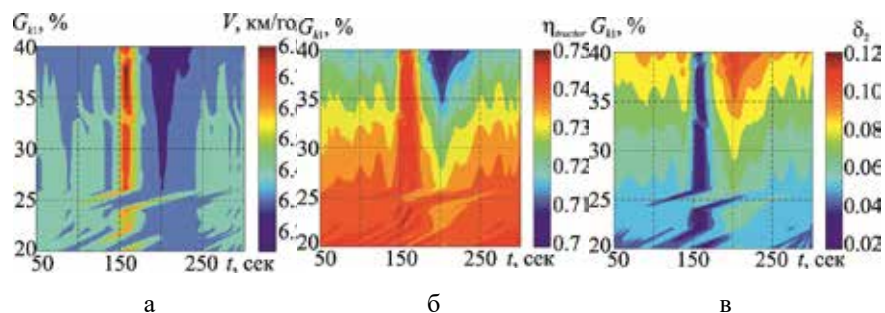


Рис. 4. Залежність тягово-енергетичних показників трактора ХТЗ-2511 від розподілу загальної ваги на передню вісь G_{k1} та часу t циклу PowerMix Z1P (рис. 3):

а – швидкість V ; б – ККД трактора $\eta_{\text{трактор}}$; в – буксування задніх коліс δ_2

Обговорення. На рис. 4 наведено результати зміни тягово-енергетичних показників при імітаційному моделюванні циклу PowerMix Z1P, який показав варіювання швидкості $V \in [6,14; 6,8]$ км/год, ККД трактора $\eta_{\text{трактор}} \in [0,7; 0,75]$, буксування задніх коліс $\delta_2 \in [0,02; 0,12]$. Дані результати отримані при варіюванні розподілу загальної ваги, яка припадає на передню вісь G_{k1} , і змінюється в межах $20 \div 50$ %. Результати з рис. 4 є не унормованими, що ускладнює надання практичних результатів, тому на рис. 5 показано середні значення показників за період імітації циклу PowerMix.

Аналізуючи отримані результати з рис. 5, відмітимо, що досягнення максимальних середніх значень

швидкості і ККД трактора, а також мінімального середнього значення буксування для циклу:

Z1P → при $G_{k1} = 20$ % від G ($l_1 = 0,367$ м та $l_1 = 1,47$ м);
 Z2P → при $G_{k1} = 21$ % від G ($l_1 = 0,386$ м та $l_1 = 1,451$ м);
 Z1G → при $G_{k1} = 22$ % від G ($l_1 = 0,404$ м та $l_1 = 1,433$ м);
 Z2G → при $G_{k1} = 33$ % від G ($l_1 = 0,606$ м та $l_1 = 1,231$ м);
 Z3K → при $G_{k1} = 22$ % від G ($l_1 = 0,404$ м та $l_1 = 1,433$ м);
 Z4K → при $G_{k1} = 30$ % від G ($l_1 = 0,551$ м та $l_1 = 1,286$ м);
 Z5K → при $G_{k1} = 40$ % від G ($l_1 = 0,735$ м та $l_1 = 1,102$ м);
 Z3M → при $G_{k1} = 40$ % від G ($l_1 = 0,735$ м та $l_1 = 1,102$ м);
 Z4M → при $G_{k1} = 47$ % від G ($l_1 = 0,863$ м та $l_1 = 0,974$ м);
 Z5M → при $G_{k1} = 50$ % від G ($l_1 = 0,919$ м та $l_1 = 0,919$ м);
 Z6MS → при $G_{k1} = 40$ % від G ($l_1 = 0,735$ м та $l_1 = 1,102$ м);
 Z7PR → при $G_{k1} = 50$ % від G ($l_1 = 0,919$ м та $l_1 = 0,919$ м).

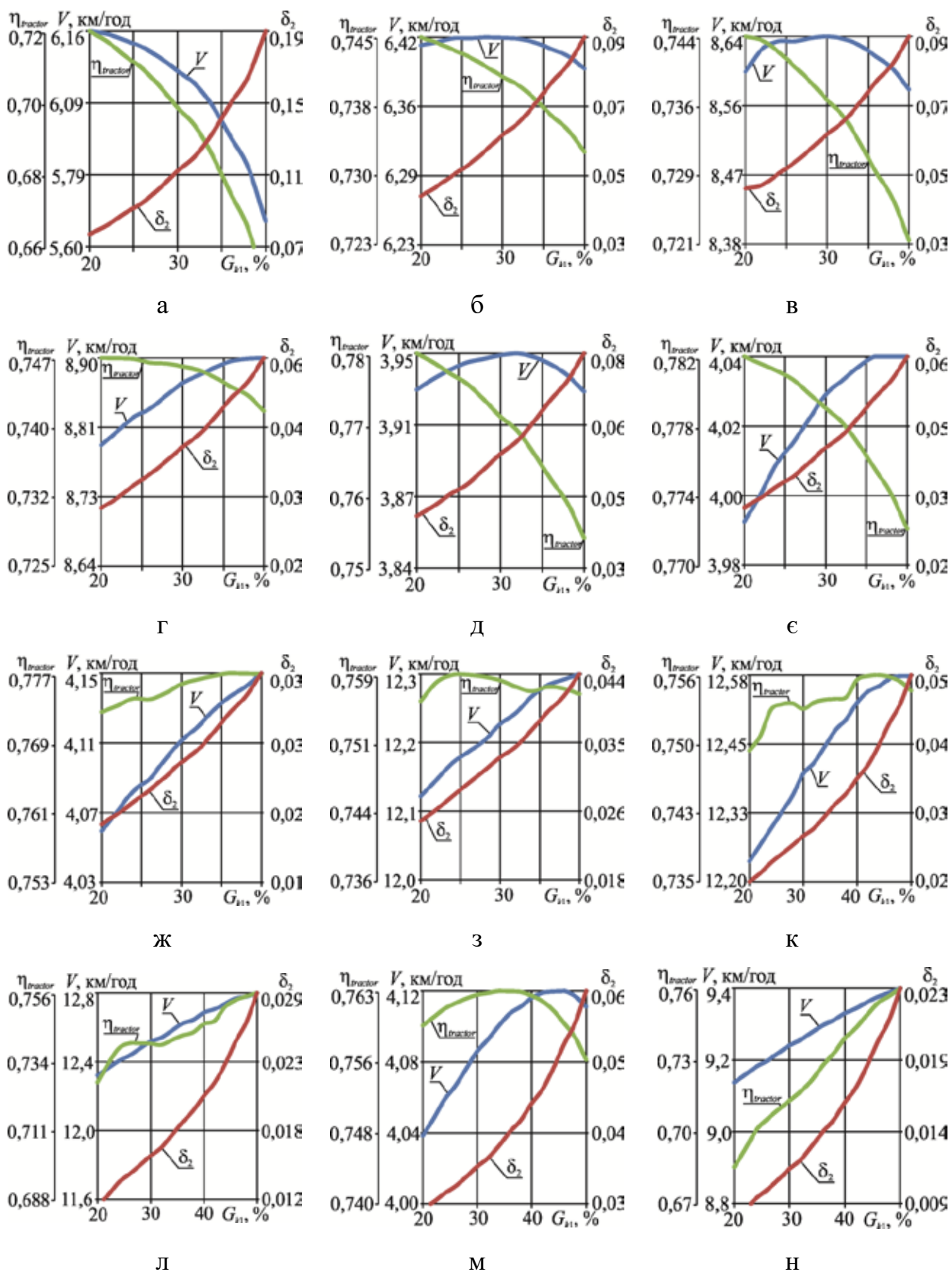


Рис. 5. Середні значення тягово-енергетичних показників трактора ХТЗ-2511 від розподілу загальної ваги на передню вісь G_{11} при різноманітних циклах PowerMix:

а – Z1P; б – Z2P; в – Z1G; г – Z2G; д – Z3K; е – Z4K; ж – Z5K; з – Z3M; к – Z4M; л – Z5M; м – Z6MS; н – Z7PR

Як помітно з результатів значення умовного розподілу загальної ваги, яка припадає на передню вісь G_{k1} , має широкий діапазон змін для ефективнішої реалізації тягово-енергетичних показників. Такий розподіл ваги складно реалізувати, тому наступним кроком необхідно проаналізувати вплив тиску в шинах і скорегувати отриманий розподіл.

Висновки. В ході популярного процесу впровадження електричного приводу замість двигуна внутрішнього згорання в мінітрактори типу ХТЗ-2511 актуальним стає питання підбору складових електроприводу. Такий підбір повинен ґрунтуватися на вагові характеристики, які впливають на тягово-енергетичні показники.

На основі процедури випробувальних циклів PowerMix для сільськогосподарського трактора при виконанні польових операцій отримано значення умовного розподілу загальної ваги мінітрактора з метою отримання максимальних середніх значень швидкості і ККД трактора, а також мінімального середнього значення буксування. Для агрегування плугом Z1P, Z2P отримано розподіл в межах 20/80 %; агрегування культиватором Z1G, Z2G – 27/73 %; агрегування роторною фрезою Z3K, Z4K, Z5K – 31/69 %; агрегування сінокосаркою Z3M, Z4M, Z5M – 45/55 %; машина для розкидання гною Z6MS 40/60 %; машина для тюкування сіна Z7PR – 50/50 %.

Бібліографічні посилання:

1. Danylenko, V., Tkachov, V., Kozhushko, A. & Horbov, O. (2023). Obgruntuvannia konstruktsiinoho vyboru sylovyi ustanovy elektrotraktora [Justification of the design choice of the electric tractor power plant]. *Visnyk NTU "KhPI". Ser. : Avtomobile- ta traktorobuduvannia*, № 2, pp. 43–51. (in Ukrainian). doi:10.20998/2078-6840.2023.2.05.
2. DLG Test Report database (2023). *DLG Agriculture*. Retrieved from: <https://www.dlg.org/en/agriculture/tests/query-for-test-reports/>.
3. Gade, C.R. & Wahab, R.S. (2023). Conceptual framework for modelling of an electric tractor and its performance analysis using a permanent magnet synchronous motor. *Sustainability*, Vol. 15 (19), 14391. doi:10.3390/su151914391.
4. Kalchenko, B., Rebrov, O., Mamontov, A., Kozhushko, A. & Yakunin, M. (2021). *Dynamika rukhu kolisnykh traktoriv : monohrafiia* [Dynamics of movement of wheeled tractors: monograph]. Kharkiv : Miroshnychenko O.A., 320 p. (in Ukrainian)
5. KhTZ-2511 and KhTZ-3510 tractors. Operating instructions (2005). *Kharkiv Tractor Plant*. Retrieved from: <http://xtz.ua/files/pdf/2511.pdf>.
6. Kozhushko, A., Danylenko, V. & Selevich, S. (2022). Analiz rozvytku transmisiinykh ustanovok suchasnykh kolisnykh traktoriv [Analysis in development of transmissions for modern wheeled tractors]. *Visnyk NTU "KhPI". Ser. : Avtomobile- ta traktorobuduvannia*, № 2, pp. 118–131. (in Ukrainian). doi:10.20998/2078-6840.2022.2.13.
7. Lebedev, A., Shevchenko, Y. & Kot, A. (2004). Balans potuzhnosti ta KKD traktornoho ahrehatu z pryvodom vid VVP aktyvnykh robochykh orhaniv silhospmashyn [Balance of power and efficiency of a tractor unit driven by the PTO of active working bodies of agricultural machines]. *Visnyk KhNTUSH im. P. Vasylenka. Seriya: Tekhnichni nauky*, № 107, т. 2. С. 154–161. (in Ukrainian)
8. Liu, M., Xu, L. & Zhou, Zh. (2016). Design of a Load Torque Based Control Strategy for Improving Electric Tractor Motor Energy Conversion Efficiency. *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2016. doi:10.1155/2016/2548967.
9. Moreda, G.P., Muñoz-García, M.A. & Barreiro, P. (2016). High voltage electrification of tractor and agricultural machinery – A review. *Energy Conversion and Management*, vol. 115, pp. 117–131. doi:10.1016/j.enconman.2016.02.018.
10. Panov, I. M. & Vetokhyn, V.I. (2008). *Fyzychni osnovy mekhaniky gruntiv* [Physical foundations of soil mechanics]. Kyiv : Fenyks, 266 p.
11. Rebrov, O. (2015). Identyfikatsiia silskohospodarskykh traktornykh shyn chyselnym metodom [Identification of agricultural tractor tires by numerical method]. *Visnyk NTU "KhPI". Ser. : Matematychnе modeliuvannia v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*, № 6 (1115), pp. 114–121 (in Ukrainian).
12. Rebrov, O. (2021). *Vybir parametriv shyn silskohospodarskykh traktoriv: monohrafiia* [Selection of agricultural tractor tire parameters: monograph]. Kharkiv: Miroshnychenko O.A., 304 p. (in Ukrainian).
13. Rebrov, O., Kozhushko, A., Kalchenko, B., Mamontov, A., Zakovorotniy, A., Kalinin, E. & Holovina, E. (2020). Mathematical model of diesel engine characteristics for determining the performance of traction dynamics of wheel-type tractor. *EUREKA: Physics and Engineering*, № 4, P. 90 – 100. doi:10.21303/2461-4262.2020.001352.

Tkachov V. Yu., National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

Kozhushko A. P., Doctor of Engineering Science, Associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

Influence of axle weight distribution a minitractor weight distribution on its traction indicators under simulated PowerMix cycles

In the conditions of deterioration of the environment due to emissions and reduction of fossil fuel reserves in various industrial sectors, the transfer of funds to alternative clean energy is a promising way. This development encourages the modernization of not only automotive, but also other specialized equipment, in particular, wheeled tractors. In agriculture, tractors of various traction classes are used for traction and transport work. Today, the introduction of an electric drive on tractors of small traction classes, which are intended for inter-row processing of row crops, plowing light soils in gardens and greenhouses, for working with a mower, as well as for small transport works, is relevant today. Such implementation is implemented by replacing the internal combustion engine with an electric drive, in connection with this, the task of observing the traction properties of the tractor arises. Therefore, the material of this article aims to numerically analyze the influence of the weight distribution of the minitractor on its traction and energy indicators. The implementation of the outlined goal takes place at the expense of a simulated numerical experiment of traction test cycles. When solving the

goal, the German Agricultural Society DLG-PowerMix dynamic testing method is used, which includes 12 stages of testing an agricultural tractor in field operations under varied external loads. The result is a justified selection of the conditional distribution of the total weight of the minitractor with observance of the maximum average values of the speed of movement and efficiency of the tractor, as well as the minimum average value of skidding, as those that should be implemented in an electric tractor. The practical significance of the work consists in providing specific values of weight distribution on the axis of the minitractor when aggregating with a plow, a cultivator, a rotary cutter and a hay mower, as well as taking into account the operation of a manure spreader and a hay baler. The scientific novelty of the work is the establishment of the relationship between the design parameters of the minitractor and the change in traction and energy indicators during the execution of technological works, namely between the weight distribution of the tractor and the speed of movement, tractor efficiency and wheel slippage.

Key words: tractor, traction-energy indicators, field operation, weight distribution, test cycles, PowerMix, simulation modeling.