



Механізація, електрифікація

УДК 631.7

© 2024

ВИЗНАЧЕННЯ НОМІНАЛЬНОГО ТЯГОВОГО ЗУСИЛЛЯ ТРАКТОРА

В.Т. Надикто

*доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НААН
Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного
вул. Жуковського, 66, м. Запоріжжя, 69063, Україна*

*Національна академія аграрних наук України
вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 9, м. Київ, 01010, Україна*

e-mail: nadyktonvt@meta.ua

ORCID: 0000-0002-1770-8297

Надійшла 16.10.2024

Мета. Сформулювати на понятійному і методичному рівнях визначення номінального тягового зусилля (НТЗ) трактора на підставі теоретичного аналізу його зміни за лінійного характеру буксування рушіїв колісного енергетичного засобу. **Методи.** Теоретичні дослідження проводили з використанням основ вищої математики та теорії тягової динаміки трактора, що розглядають залежність тягового ККД і лінійного закону буксування рушіїв колісного енергетичного засобу від реалізованого ним тягового зусилля. Розрахунки виконували у програмному середовищі Mathcad 15.0. **Результати.** За лінійного характеру залежності буксування рушіїв колісного трактора від тягового зусилля його тяговий ККД може не мати оптимуму. Для трактора ХТЗ-17021 із колісною формулою 4К46 максимальне значення цього параметра становить 0,642 і досягається за тягового зусилля 33 кН та граничного буксування 15%. Оптимальне значення тягового ККД трактора становить 0,646, проте реалізується воно за буксування його рушіїв 17,6%, що перевищує гранично допустиме значення, а тому є неприйнятним. **Висновки.** Коли тягове зусилля енергетичного засобу у разі максимального рівня його тягового ККД ($P_{кр\eta}$) не перевищує тягового зусилля за граничного буксування ($P_{кр\delta}$), номінальне тягове зусилля трактора ($P_{кр.н}$) на будь-якому агротехнічному фоні дорівнює середньому арифметичному між цими зусиллями, а інтервал допуску на НТЗ розраховується за виразом $P_{кр.н} = 0,5 \cdot [(P_{кр\eta} + P_{кр\delta}) \pm (P_{кр\eta} - P_{кр\delta})]$. В іншому разі номінальне тягове зусилля трактора визначається тяговим зусиллям за граничного буксування його рушіїв, а інтервал допуску на НТЗ розраховується за виразом $P_{кр.н} = (0,9 - 1,0)P_{кр\delta}$.

Ключові слова: тяговий ККД, граничне буксування, коефіцієнт використання зчіпної ваги, коефіцієнт опору коченню.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202412-06>

Одним із визначальних понять агрегування (експлуатації) сільськогосподарської техніки є *номінальне тягове зусилля* трактора. Його кількісне значення розглядається як базове для здійснення обґрунтованого вибору складу тягових та тягово-привідних машинно-тракторних агрегатів (МТА) [1, 2]. До того ж цей параметр виступає ключовим елементом під час формування типу тракторів, а отже, і Системи машин України [3].

Однак зазначений показник, попри свою важливість, не має достатньо чіткого й однозначного визначення. Штучний «інтелект» у вигляді ChatGPT (<https://openai.com>), наприклад, наводить таке формулювання: «Номінальне тягове зусилля трактора — це максимальна сила, яку він може розвинути на своїх колесах за певних умов експлуатації». Досить близьким до нього є визначення, яке дав один із розробників теорії тягової динаміки трактора: «Номінальне тягове зусилля — це таке його значення, за якого забезпечується найповніше використання тягово-енергетичних властивостей трактора» [Кутьков Г.М., 2004].

Наведені визначення породжують низку питань. По-перше, що мається на увазі під максимальною силою? Вона може бути як дотична, так і тягова, що від першої менша принаймні на силу опору коченню. По-друге, при використанні номінального тягового зусилля трактора оперують не «певними», а цілком конкретними умовами експлуатації того чи іншого енергетичного засобу. По-третє, на практиці повнота використання тягово-енергетичних властивостей трактора також має конкретні числові виміри.

Конкретніше визначення НТЗ дає стандарт ГОСТ 27021-86 (СТ СЕВ 628-85): «Номінальне тягове зусилля — це зусилля, яке трактор створює на стерні середньої щільності і нормальної (8–18%) вологості в зоні максимального значення

тягового ККД за експлуатаційної маси, передбаченої технічною характеристикою (для колісних тракторів із баластним вантажем) при граничному буксуванні, рівному 18, 16 і 5% відповідно для колісних 4К2, 3К2 і 4К4 та гусеничних тракторів. Але і це визначення має свої недоліки. По-перше, воно не дає розуміння того, яку щільність стерньового фону поля слід вважати середньою. По-друге, незрозуміло, чому розглядається лише стерньовий фон. Практика показує, що значний час трактори використовуються на фоні «поле, підготовлене до сівби» або на фоні «злуцено стерня», який за характеристиками ґрунту досить близький до першого. По-третє, із визначення цього стандарту випливає, що під НТЗ мається на увазі гранична за буксуванням сила, яка проявляється у зоні максимального тягового ККД трактора. Однак такий стан речей, як буде показано далі, є швидше окремим винятком, ніж загально-мірним явищем.

У визначенні СТ СЕВ 628-85 також говориться, що граничне буксування колісних енергетичних засобів становить 16 і 18%. Водночас чіткого обґрунтування цих величин на теперішній час не існує. На практиці ж спостерігається тенденція до реалізації більших значень цього параметра. Пояснюється це тим, що максимальна дотична сила тяги трактора проявляється за буксування його рушіїв на рівні, який становить не 16–18, а 22–24% [Гуськов В.В., 1988].

Нашими дослідженнями доведено, що задля збереження структури (а отже, й родючості) ґрунту граничне буксування рушіїв колісних енергетичних засобів не має перевищувати 15% [4–6]. На сучасному етапі господарювання переважна більшість із таких засобів є повнопривідними із колісною формулою 4К4а або 4К4б. Графічна інтерпретація залежності буксування (до 15%) від тягового зусилля

трактора носить лінійний характер, а його тяговий ККД при цьому може не мати оптимуму. Все це створює проблеми при визначенні номінального тягового зусилля енергетичного засобу, причому як на понятійному, так і на методичному рівнях.

Мета досліджень — сформулювати на понятійному і методичному рівнях конкретне визначення номінального тягового зусилля трактора на підставі теоретичного аналізу його зміни за лінійного характеру буксування рушіїв колісного енергетичного засобу.

Методи досліджень. Теоретичні дослідження проводили з використанням основ вищої математики та теорії тягової динаміки трактора, які розглядають залежність тягового ККД і лінійного закону буксування рушіїв колісного енергетичного засобу від реалізованого ним тягового зусилля. Розрахунки здійснювали у програмному середовищі Mathcad 15.0.

Результати досліджень. Розглянемо графічну інтерпретацію залежності тягового ККД трактора (η) і буксування його рушіїв (δ) від тягового зусилля ($P_{кр}$). У тракторів із рівнем енергонасиченості до 10 кВт/т максимуму тягового ККД відповідають відносно низька швидкість руху і високе тягове зусилля. Сучасні енергетичні засоби мають такий рівень енергонасиченості, за якого максимум їхнього тягового ККД має тенденцію до зміщення у бік менших тягових зусиль [7, 8]. У такому разі максимальне значення параметра η (η_{max}) перебуватиме переважно в т. А (рис. 1), який відповідає тягове зусилля трактора $P_{кр\eta}$. Значення тягового ККД, що відповідає граничному буксуванню рушіїв енергетичного засобу (δ_{max}), є меншим за η_{max} . Воно перебуває в т. В і припадає на тягове зусилля $P_{кр\delta}$, яке є більшим за $P_{кр\eta}$.

Із означеного вище випливає, що в зоні А–В, яку репрезентує діапазон тягових зусиль $\Delta P_{кр}$, спостерігатиметься оптимальна (максимальна) продуктивність роботи МТА. Щоправда, вона, з одного боку, обмежена η_{max} (т. А), а з іншого — δ_{max} (т. В). З огляду на це номінальне тягове зусилля трактора має перебувати між $P_{кр\eta}$ і $P_{кр\delta}$ зі значенням, яке дорівнює

середньому арифметичному цих величин. Аналітично це можна подати так:

$$P_{кр.н} = 0,5 \cdot [(P_{кр\eta} + P_{кр\delta}) \pm (P_{кр\eta} - P_{кр\delta})]. \quad (1)$$

Момент, коли $P_{кр\eta} = P_{кр\delta}$, а значить, $P_{кр.н} = 0,5 \cdot (P_{кр\eta} + P_{кр\delta})$, може бути лише окремим випадком закономірності (1). Імовірність такого стану речей загалом є можливою, але вкрай малою.

За граничного буксування рушіїв енергетичних засобів 15% (а в найближчому майбутньому — ще меншого) цілком реальним є такий стан речей, за якого $P_{кр\eta}$ перевищує $P_{кр\delta}$. Максимальне значення тягового ККД трактора при цьому перебуватиме правіше від того (т. В, рис. 1), яке репрезентує значення тягового ККД за граничного буксування рушіїв енергетичного засобу. У такому разі НТЗ трактора регламентуватиметься тяговим зусиллям $P_{кр\delta}$, оскільки тягове зусилля $P_{кр\eta}$ досягається за буксування, що перевищує δ_{max} .

Розглянемо реальний процес перебігу такого явища. Як уже підкреслювалось вище, встановлення граничного буксування (δ) рушіїв колісного трактора формули 4К4 на рівні 15% зумовлює лінійний характер залежності цього параметра від тягового зусилля ($P_{кр}$) енергетичного засобу:

$$\delta = a \cdot \varphi_{кр} + b = a \cdot \frac{P_{кр}}{G} + b, \quad (2)$$

де a , b — коефіцієнти лінійної апроксимації буксування рушіїв трактора; $\varphi_{кр}$ — коефіцієнт використання зчпної ваги трактора; G — зчпна вага, кН.

За лінійного характеру буксування рушіїв енергетичного засобу формула

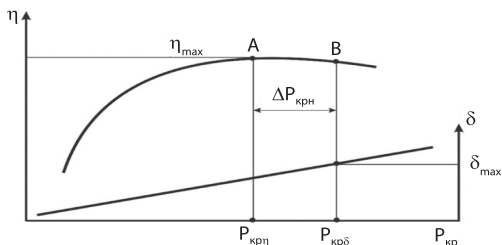


Рис. 1. Функціональні залежності тягового ККД і буксування трактора від його тягового зусилля



Рис. 2. Трактор ХТЗ-1721 з плугом

для розрахунку його тягового ККД (η) має такий вигляд [9, 10]:

$$\eta = \frac{\eta_{\text{тр}} \cdot \varphi_{\text{кр}} \cdot (1 - a \cdot \varphi_{\text{кр}} - b)}{\varphi_{\text{кр}} + f}, \quad (3)$$

де $\eta_{\text{тр}}$ — ККД трансмісії трактора; f — коефіцієнт опору коченню.

У подальшому аналізі залежність (3) розглянемо стосовно вітчизняного трактора тягового класу 3 ХТЗ-17021 з колісною формулою 4К46. В результаті польових випробувань цього енергетичного засобу з плугом (рис. 2) отримано значення констант апроксимації (a і b) буксування його рушіїв на фоні «злущена стерня» (таблиця).

Для визначення оптимального (максимального) значення тягового ККД трактора слід розглянути першу похідну виразу (3) щодо коефіцієнта $\varphi_{\text{кр}}$. Вона є такою:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \varphi_{\text{кр}}} = \varphi_{\text{кр}}^2 + 2f\varphi_{\text{кр}} - \frac{f}{a} \cdot (1 - b). \quad (4)$$

Технічна характеристика трактора ХТЗ-17021

Параметр	Позначення, розмірність	Значення
Експлуатаційна вага	G, кН	81,5
Потужність двигуна	N _е , кВт	132,3
Колеса	4К46	23,1R26
ККД трансмісії	$\eta_{\text{тр}}$	0,94
Константи апроксимації	a	0,27
	b	0,04

Прирівнявши (4) до нуля, отримаємо рівняння для розрахунку такого значення параметра $\varphi_{\text{кр}}$, за якого тяговий ККД трактора η є максимальним:

$$\varphi_{\text{кр}} = -f + \sqrt{f^2 + \frac{f}{a} \cdot (1 - b)}. \quad (5)$$

Далі розглянемо залежності $\eta = f(P_{\text{кр}})$ і $\delta = f(P_{\text{кр}})$ для трактора на стерньовому фоні з типовим для нього значенням коефіцієнта опору коченню $f = 0,10$ [1]. Із аналізу цих залежностей випливає, що за умови $\delta \leq 15\%$ тяговий ККД ХТЗ-17021 оптимуму не має (рис. 3).

Максимальне значення тягового ККД становить 0,642 (т. С), а досягається воно за тягового зусилля 33 кН та граничного буксування енергетичного засобу 15% (т. D). Слід зазначити, що в якісному плані такий результат є закономірним і його залежність від агротехнічного фону репрезентується коефіцієнтом опору коченню f . Від значення останнього залежатимуть інші значення коефіцієнтів апроксимації буксування a і b .

Максимальне (оптимальне) значення тягового ККД трактора (на рис. 3 не показано), розраховане за формулою (5), становить 0,646. Цьому значенню відповідають тягове зусилля 41,1 кН і буксування рушіїв енергетичного засобу 17,6%. У підсумку маємо ситуацію, коли $P_{\text{кр}\eta} > P_{\text{кр}\delta}$. А це означає, що з урахуванням граничного буксування трактора на рівні 15% його номінальне тягове зусилля обмежу-

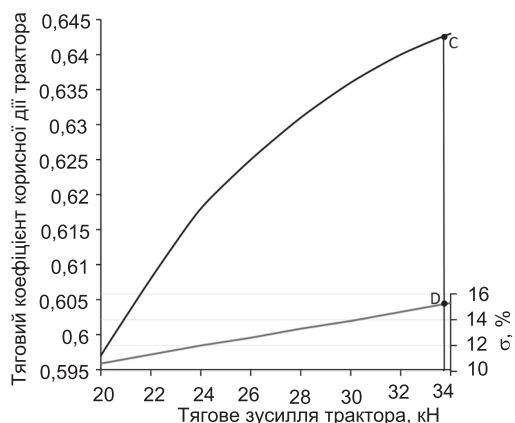


Рис. 3. Тягово-енергетичні показники трактора ХТЗ-17021

ється і одночасно з цим визначається величиною $P_{кр.н} = P_{кр.б} = 33$ кН.

Залишається одне проблемне питання: яким має бути інтервал допуску на номінальне тягове зусилля? Перевищувати рівень $P_{кр.б}$ значення $P_{кр.н}$ не повинно. Якщо

враховувати дані авторів праці [3], то НТЗ трактора може відхилитись у бік зменшення на 10%. Отже,

$$P_{кр.н} = P_{кр.б}^{-10\%} = (0,9 - 1,0)P_{кр.б}. \quad (6)$$

З урахуванням викладеного можна запропонувати таке визначення номінального тягового зусилля трактора: це середнє арифметичне між його тяговими зусиллями за максимального значення тягового ККД і граничного значення буксування рушіїв на будь-якому агротехнічному фоні за умови, що перше тягове зусилля не перевищує другого. У протилежному разі номінальне тягове зусилля трактора обмежується граничним значенням буксування його рушіїв. На думку автора, таке визначення є новим і конкретним в рамках лінійного характеру залежності буксування рушіїв колісного трактора від реалізованого ним тягового зусилля.

Висновки

Запропоновано нове визначення номінального тягового зусилля трактора. Воно подається як на понятійному, так і на методичному рівнях з урахуванням неможливості досягнення енергетичним засобом максимального значення тягового ККД за умови лінійного характеру залежності буксування від розвинутого тягового зусилля. За умови, коли тягове зусилля енергетичного засобу за максимального рівня його тягового ККД не

перевищує тягового зусилля за граничного буксування на будь-якому агротехнічному фоні, номінальне тягове зусилля трактора дорівнює середньому арифметичному між цими зусиллями, а інтервал допуску на НТЗ розраховується за виразом (1). У протилежному разі номінальне тягове зусилля трактора визначається тяговим зусиллям за граничного буксування його рушіїв, а інтервал допуску на НТЗ розраховується за виразом (6).

Nadykto V.

Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, 66 Zhukovskiy Str., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine; e-mail: nadyktonvt@meta.ua; ORCID: 0000-0002-1770-8297

Determining the tractor's nominal traction force

Goal. To formulate at the conceptual and methodological levels the determination of the nominal tractive effort (NTE) of a tractor based on a theoretical analysis of its change under the linear nature of the slippage of the drives of a

wheeled power vehicle. **Methods.** Theoretical studies were conducted using the foundations of higher mathematics and the theory of tractor traction dynamics, which consider the dependence of the traction efficiency and the linear law of the slippage of the drives of a wheeled power vehicle on the traction effort realized by it. Calculations were performed in the Mathcad 15.0 software environment. **Results.** Under the linear nature of the dependence of the slippage of the drives of a wheeled tractor on the traction effort, its traction efficiency may not be optimal. For the tractor KhTZ-17021 with the wheel formula 4K4b,

the maximum value of this parameter is 0.642 and is achieved at a traction force of 33 kN and a maximum slip of 15%. The optimal value of the tractor's traction efficiency is 0.646, but it is realized at a slip of its engines of 17.6%, which exceeds the maximum permissible value, and therefore is unacceptable. **Conclusions.** When the traction force of the power tool at the maximum level of its traction efficiency ($P_{кр\eta}$) does not exceed the traction force at the maximum slip ($P_{кр\delta}$), the nominal traction force of the tractor ($P_{крn}$) on any agrotechnical background is equal

to the arithmetic mean between these forces, and the tolerance interval for NTE is calculated by the expression $P_{крn} = 0.5 \cdot [(P_{кр\eta} + P_{кр\delta}) \pm (P_{кр\eta} - P_{кр\delta})]$. Otherwise, the nominal tractive effort of the tractor is determined by the tractive effort at the maximum slippage of its engines, and the tolerance interval for the NTE is calculated by the equation $P_{крn} = (0.9 \dots 1.0) \cdot P_{кр\delta}$.

Key words: *tractive efficiency, maximum slippage, coupling weight utilization factor, rolling resistance coefficient.*

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202412-06>

Бібліографія

1. Ільченко В.Ю., Нагірний Ю.П., Джолос П.А. та ін. *Машиновикористання в землеробстві*. Київ: Урожай, 1996. 384 с.
2. Білоконь Я.Ю., Окоча А.І., Войцехівський С.О. *Трактори та автомобілі: підручник*. Київ: Вища освіта, 2003. 560 с.
3. Адамчук В.В., Булгаков В.М., Надикто В.Т., Кюрчев В.М. Теоретичне обґрунтування типу колісних сільськогосподарських тракторів для України. *Вісник аграрної науки*. 2017. № 1. С. 43–47.
4. Nadykto V., Arak M., Olt J. Theoretical research into the frictional slipping of wheel-type undercarriage taking into account the limitation of their impact on the soil. *Agronomy Research*. 2015. V. 13. N 1. P. 148–157.
5. Bulgakov V., Aboltins A., Beloev H. et al. Maximum admissible slip of tractor wheels without disturbing the soil structure. *Applied Science*. 2021. V. 11. N 15. P. 6893.
6. Bulgakov V., Chernysh O., Adamchuk V. et al. Theoretical study of the conditions of the maximum allowable slipping of wheel tractors. *Agronomy Research*. 2023. V. 21. N 1. P. 28–38.
7. Macmillan R.H. *The Mechanics of Tractor-Implement Performance: Theory and Worked Examples*. University of Melbourne, 2002. 166 p.
8. Adamchuk V., Bulgakov V., Nadykto V. et al. Theoretical research into the power and energy performance of agricultural tractors. *Agronomy Research*. 2016. V. 14. N 5. P. 1511–1518.
9. Bulgakov V., Nadykto V., Velichko I. et al. Investigation of draft coefficient of efficiency of wheeled tractor. *Engineering for Rural Development*. 2016. P. 1036–1041.
10. Надикто В., Кюрчев В. *Нові елементи теорії тягової динаміки та експлуатації колісних тракторів. Техніка і технології АПК*. 2020. № 4. С. 21–26.