

УДК 629.114

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.5-2/26>**Третяк В.М.**

Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства»

**Оляднічук Р.В.**

Уманський національний університет садівництва

**Кравченко В.В.**

Уманський національний університет садівництва

**Ковальчук Ю.О.**

Уманський національний університет садівництва

**Третяк М.К.**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ПРИ РУСІ ТРАКТОРА НА РІЗНИХ ОПОРНИХ ПОВЕРХНЯХ

Авторами проведені експериментальні дослідження для визначення витрат енергії на взаємодію колісних рушіїв з опорною поверхнею.

У статті представлені результати досліджень споживаної потужності, яка витрачається на рух трактора на різних опорних поверхнях (дорога з асфальтовим покриттям, стерня зернових культур та рілля). На тракторі заводської комплектації доволі складно визначити складники величини витрат потужності на його рух. З огляду на це дослідження проводили на електричному тракторі ХТЗ-2511Е, який розроблений фахівцями ННЦ «ІМЕСГ» спільно з ПАТ «Харківський тракторний завод».

Методика досліджень базується на прямих вимірюваннях споживаної потужності, яку електротрактор споживає безпосередньо з акумулятора. Для цього за допомогою аналогово-цифрового перетворювача реєстрували величину напруги на ПК, сигнал отримували з паралельно приєданого подільника напруги. Значення сили струму знімали з додатково встановленого шунта. Таким чином, величину споживаної потужності в часі отримували множенням показників напруги на силу струму. Вимірювана величина споживаної потужності на акумуляторі трактора включає такі складники: енергію, що витрачається на роботу електродвигуна та контролера при перетворенні постійного струму на змінний; механічні втрати в трансмісії трактора; потужність, що витрачається на взаємодію шин з опорною поверхнею. Аналіз результатів експериментальних досліджень споживаної потужності показав значну варіацію змін величини потужності залежно від опорної поверхні та тиску повітря в шинах. Під час руху на поверхні, яка деформується, значна частина енергії витрачається на утворення колії.

У статті обґрунтовується необхідність застосування обладнання, яке б дозволяло контролювати та коригувати тиск повітря в шинах відповідно до умов роботи.

**Ключові слова:** колісний трактор, споживана потужність, шини, опорна поверхня, тиск повітря в шинах.

**Постановка проблеми.** Підвищення ефективності роботи колісних тракторів є пріоритетним напрямом розвитку механізації сільського господарства. Взаємодія пневматичного колеса з опорною поверхнею призводить до значних енергетичних витрат, які характеризують економічність та тягово-зчіпні властивості сільськогосподарських тракторів. Відомо, що тяговий ККД коліс-

них тракторів складає 58–68%. Значна частина цих витрат залежить від конструкційних особливостей трактора, а на втрати в ходових системах, які складають до 20%, можна впливати.

Процес взаємодії колісного рушія з опорною поверхнею характеризується, з одного боку, параметрами рушія (ширина та діаметр колеса, тиск повітря в шинах, рисунок протектора та його величина

і розміщення) та навантаженням на нього, а з іншого, – фізико-механічними властивостями поверхні руху (вологість, щільність, пористість). Під час контакту колеса з ґрунтом виникає його деформація у вертикальному, поздовжньому та бічному напрямках. Вертикальні деформації ґрунту призводять до витрат енергії на утворення колії, тобто кочення колеса. Поздовжні (горизонтальні) деформації характеризують зчеплення з ґрунтом. Численні деформації елементів шини супроводжуються великими втратами енергії, в результаті чого шина нагрівається та змінює свої експлуатаційні властивості.

Визначення даних втрат на різних поверхнях за різних експлуатаційних умов досить складне, тому, як правило, виконують його на стендах без врахування реальних умов кочення колеса. Застосування електротрактора дозволяє виконати прямі вимірювання витрат потужності ходовими системами на перекочування та утворення колії на різних фонах.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

У класичній теорії руху тягово-транспортних засобів величина потужності, що витрачається на деформацію опорної поверхні, визначається на підставі визначення сили опору руху  $P_f$  за допомогою коефіцієнтів опору руху  $f$  різних типів рушіїв на різних опорних поверхнях [1, с. 32; 2, с. 27; 3, с.44]. Здебільшого під час теоретичного дослідження процесів, які відбуваються при русі колеса опорною поверхнею, яка деформується, математичні моделі є досить складними для практичних розрахунків [4, с. 7].

Автор навчального посібника [5, с. 46] запропонував методику визначення сили опору кочення  $P_f$ , аналізуючи величину роботи, яка витрачається на утворення колії колесом. Дослідження показали, що опорна поверхня еластичного колеса при коченні його пластичною поверхнею близька до циліндричної. Отже, при наближеній теоретичній оцінці  $P_f$  еластичне колесо умовно можна замінити жорстким зі збільшеним діаметром порівняно з реальним. Розраховані значення коефіцієнту опору кочення  $f$  даним методом є наближеними, і в деяких випадках їх значення суттєво перевищують реальні значення. Однак теоретичний підхід дозволяє спрогнозувати ступінь впливу зміни параметрів колеса або стану ґрунту на зміну глибини колії та силу опору коченню колеса  $P_f$ .

У роботі [6, с. 69] подано методику визначення механічної потужності, яка витрачається на утворення колії ходовою системою тягово-транспортних засобів, та результати теоретич-

них досліджень зміни енергетичних складників руху. Методика ґрунтується на зміні енергетичних показників кочення колеса залежно від швидкості утворення колії, яка залежить від глибини колії, швидкості руху тягово-транспортного засобу та радіуса кочення колеса. Відповідно до прийнятих припущень, що  $V=\text{const}$  та  $R=\text{const}$ , час на утворення колії буде залежати від довжини шляху ущільнення та швидкості руху.

Дослідження показали, що потужність стрімко зростає на перших 5 см утворення глибини колії, а потім спостерігається майже лінійна залежність. Величина потужності більше залежить від радіуса колеса, ніж від глибини колії. З огляду на отримані дані для зменшення втрат енергії необхідно встановлювати якомога більшого діаметру передні колеса тракторів з колісною формулою 4К2 та 4К4а.

У роботі [7, с. 58] автори для виявлення впливу ходових систем тягово-транспортних засобів на ґрунт застосували метод визначення зміни механічних та електричних властивостей ґрунту залежно від зміни його внутрішнього тиску. З допомогою методів геофізичної електророзвідки вирішувалась зворотна задача – визначення зміни тиску в ґрунті від реєстрації зміни його електропровідності.

У роботі [8, с. 74] автори запропонували пристрій, який дозволяє проаналізувати гістерезисні втрати та тиск повітря в шинах під час експлуатації. Робота приладу базується на зміні внутрішнього об'єму шини під час деформації. Згідно з результатами досліджень встановлені такі складники енергетичних втрат: гістерезисні втрати в шині (до 90% всіх втрат), втрати під час ковзання шини на поверхні дороги (5–9%) та втрати енергії на подолання аеродинамічного опору (1–5%).

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження витрат енергії на взаємодію колісних рушіїв з опорною поверхнею.

#### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Відомо, що основна частина навантаження, яке діє на пневматичну шину, сприймається внутрішнім повітрям, а інша частина – матеріалом самої шини. Що більша кількість повітря в шині і його тиск, то більше навантаження може сприйняти шина, при цьому фіксуються менші гістерезисні втрати та втрати на перекочування шини. Якщо ж розглядати роботу шини на пластичній поверхні (пухкий ґрунт), то за високого тиску утворюється глибока колія та погіршуються тягово-зчепні властивості колеса. Саме тому для покращення властивостей пневматичних шин на м'яких ґрунтах

знижують тиск в шинах, завдяки чому шина стає еластичнішою, збільшується радіальна деформація, а також площа контакту з ґрунтом, унаслідок чого утворюється менш глибока колія. Здебільшого досягнення необхідної еластичності (зниження тиску) обмежується величиною радіальної деформації шини, за якої відбувається руйнування шини та збільшення гістерезисних втрат.

На тракторі заводської комплектації доволі складно визначити характер розподілу споживаної потужності, тому дослідження проводили на електричному тракторі ХТЗ-2511Е (рис. 1), який розроблений фахівцями ННЦ «ІМЕСГ» спільно з ПАТ «Харківський тракторний завод» [9, с. 202]. На тракторі встановлений трифазний електродвигун компанії “Golden Motor” номінальною потужністю 10 кВт, оснащений контролером для перетворення постійного струму на змінний та забезпечення частотного регулювання роботи електродвигуна. Маса трактора становить 2045 кг, розмірність передніх шин 6,5-16НС6, задніх – 9,5R-32НС6.



Рис. 1. Електротрактор на базі трактора ХТЗ-2511

Для визначення величини витрат енергії на переміщення електротрактора вимірювали потужність, яку він споживає безпосередньо з акумулятора. Для цього за допомогою аналогово-цифрового перетворювача реєстрували величину напруги на ПК, сигнал отримували з паралельно приєднаного подільника напруги. Значення сили струму знімали з додатково встановленого шунта. Таким чином, величину споживаної потужності в часі отримували множенням показників напруги на силу струму. Вимірювана величина споживаної потужності на акумуляторі трактора включає такі складники: енергію, що витрачається на роботу електродвигуна та контролера під час перетворення постійного струму на змінний; механічні втрати в трансмісії трактора; потужність, що витрачається на подолання опору коченню (деформація шин та опорної поверхні, подолання перешкод).

Визначення величини витрат потужності проводили на трьох таких видах опорних поверхонь: асфальтова дорога, стерня нормальної вологості після зернових колосових культур, рілля. Механічна потужність – це добуток сили опору перекочуванню  $P_f$  та поступальної швидкості. Щоб визначити силу  $P_f$ , необхідно стабілізувати швидкість. Для підтримання постійної швидкості руху на рівні 10 км/год вмикали круїз-контроль в контролері електричного двигуна. Змінюючи тиск в шинах від 60 до 160 кПа, проводили заїзди на різних поверхнях.

Час руху на асфальтовій поверхні складав 125 с, при цьому сумарні витрати потужності становили від 3,8 до 4,4 кВт (рис. 2). Найменше споживання спостерігаємо при тиску в шинах 120–140 кПа, що пов'язано з мінімальними гістерезисними втратами в шинах. Структуру розподілу споживаної потужності подано на рис. 3 за тиску повітря в шинах 100 кПа, при цьому сумарні витрати енергії становлять 4,0 кВт. Визначення величини енергії, яка витрачається на перетворення з електричної на механічну, виконували при вмиканні реверса трансмісії трансмісії в нейтральне положення. При цьому, на роботу електродвигуна та контролера витрачається 1,318 кВт, що становить 33% від сумарних витрат. Під час визначення механічних втрат в трансмісії трактора він був піднятий таким чином, щоб ведучі колеса не торкались опорної поверхні, при цьому втрати потужності в трансмісії склали 0,947 кВт. Отже, потужність, яка витрачається на подолання опору кочення коліс, становить 1,735 кВт. Оскільки асфальтова поверхня не деформується, то будемо вважати, що 1,735 кВт – це витрати на деформацію шин.

Під час руху стернею зернових колосових культур нормальної вологості витрати на рух трактора без навантаження склали від 6,5 до 7,5 кВт (рис. 2). Найменші значення отримали при тиску в шинах 80–120 кПа, найбільші – при значеннях тиску менше 80 кПа та більше 120 кПа. Аналіз структури споживаної потужності на даному на даному агрофоні або на даній поверхні (при 100 кПа) показав зростання витрат на взаємодію шини і опорної поверхні до 4,235 кВт (рис. 4). Дана енергія, крім деформації шини, витрачалась на деформацію ґрунту (2,5 кВт). При цьому перші два складники споживаної потужності залишились без змін – 1,318 та 0,947 кВт. Потрібно також зазначити, що під час руху трактора стернею без навантаження значне ущільнення ґрунту відбувалось після проходження передніх коліс, а задні колеса перекочувались лише з зануренням шипів шин.

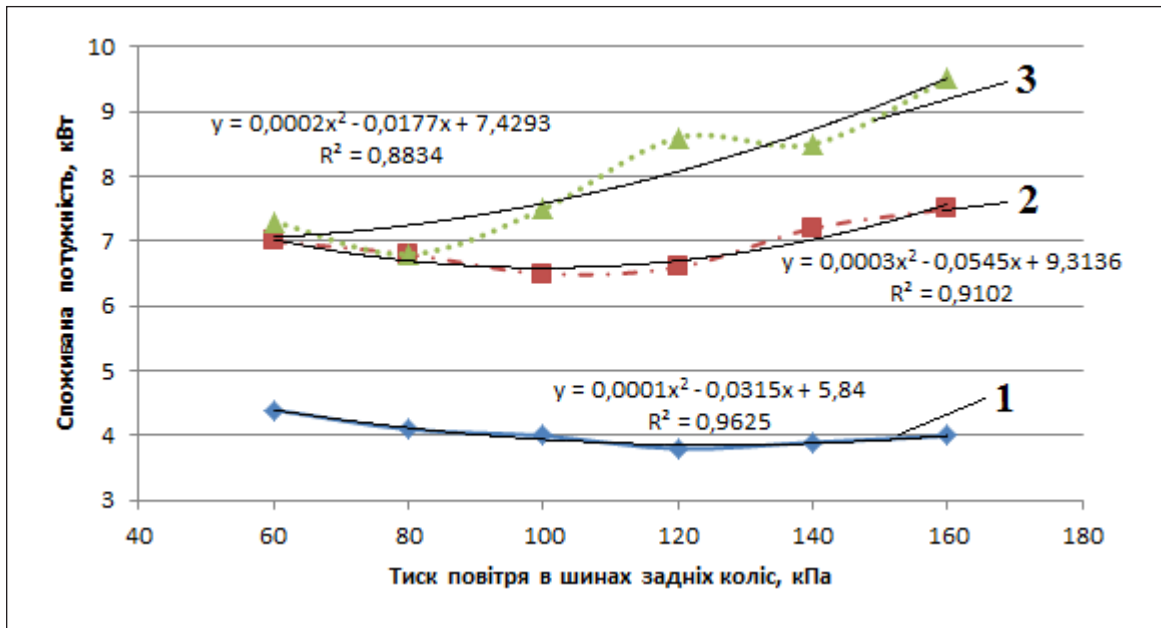


Рис. 2. Залежність необхідної споживаної потужності від АКБ на рух трактора від виду опорної поверхні та тиску повітря в шинах: 1 – асфальтова дорога; 2- стерня після зернових колосових культур; 3 – рілля.

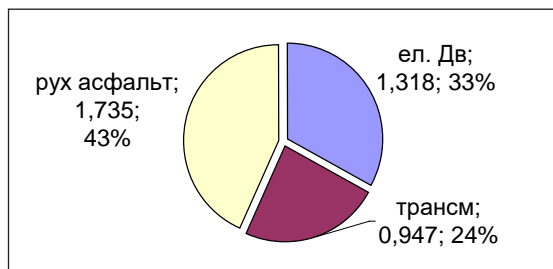


Рис. 3. Розподіл потужності на асфальті на швидкості 10 км/год

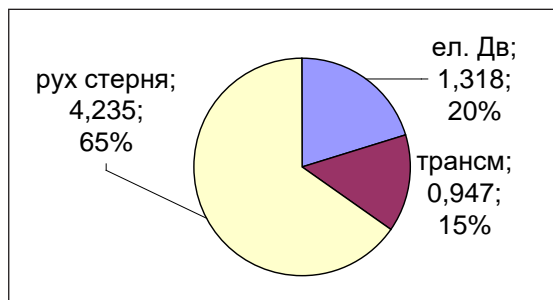


Рис. 4. Розподіл потужності при русі стернею зернових на швидкості 10 км/год

Під час руху ріллею зафіксували найбільше споживання потужності – від 6,8 до 9,5 кВт (рис. 2). При цьому мінімум витрат отримали при тиску в шинах нижче 100 кПа, оскільки за таких умов збільшується площа контакту шини з опорною поверхнею. У разі встановлення тиску більше 120 кПа збільшується глибина колії та деформація ґрунту в горизонтальному напрямку,

що призводить до зростання висоти ґрунтового клину попереду коліс. Такий ефект найчастіше спостерігається на перезволожених та пластичних ґрунтах. Що більша щільність ґрунту, то менша кількість ґрунту виштовхується убік. У структурі споживаної потужності витрати на подолання опору коченню складають від 5,235 кВт (рис. 5).

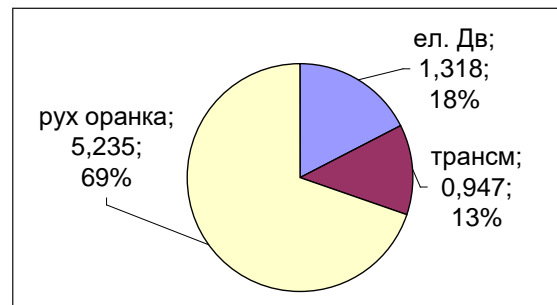


Рис. 5. Розподіл потужності під час руху ріллею на швидкості 10 км/год

На підставі експериментальних досліджень підтверджено та визначено величини витрат енергії залежно від тиску в шинах на різних опорних поверхнях. Для підвищення економічності тягово-транспортних засобів необхідно застосовувати пристрої для регулювання та контролю тиску повітря в шинах, оскільки на різних поверхнях значення оптимального тиску в шинах також є різними.

**Висновки.** Зміна тиску повітря в шинах трактора під час руху на різних опорних поверхнях суттєво впливає на витрати енергії і палива.

Під час виконання транспортних робіт трактором ХТЗ-2511 бажано підтримувати тиск повітря в шинах в межах 120–140 кПа, а під час польових робіт на стерні зернових колосових культур – в межах 80–120 кПа. Під час роботи на пухких ґрунтах, які деформуються, необхідно встановлювати тиск повітря в шинах не більше 100 кПа.

Залежно від умов експлуатації трактора ХТЗ-2511 (комунальні роботи у місті, обслуговування ферм чи польові роботи) бажано його комплектувати шинами з різними втратами на гістерезис.

Для оперативного контролю тиску повітря в шинах під час експлуатації при конструюванні нових тракторів доцільно встановлювати системи керування тиском в шинах.

#### Список літератури:

1. Кутьков Г.М. Тракторы и автомобили: теория и технологические свойства. Москва : ИНФРА-М, 2016. 504 с.
2. Рославцев А.В. Теория движения тягово-транспортных средств : учебное пособие. Москва : УМЦ «ТРИАДА», 2003. 172 с.
3. Гуськов В.В. Тракторы. Теория / под. общ. ред. В.В.Гуськова. Москва : Машиностроение, 1988. 376 с.
4. Гуськов В.В. Динамическая характеристика многоцелевых колесных машин при движении по грунтовым поверхностям. Минск : БНТУ, 2018. 38 с.
5. Савочкин В.А. Тяговая динамика колесного трактора : учебное пособие. Москва : МГТУ «МАМИ», 2005. 97 с.
6. Мінімізація втрат потужності тягово-транспортних засобів при русі по опорній поверхні, яка деформується / О.О. Можасв та ін. *Східноєвропейський журнал передових технологій*. 2019. № 1 (97), Vol 1. P. 69–74. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.156721.
7. Третьяк В.М., Болдовский В.Н., Потапов Н.Н. Метод определения воздействия ходовых систем тягово-транспортных средств на почву. *Вестник национального технического университета «ХПИ»*. 2007. Вып. 12. С. 58–62.
8. Горшков Ю.Г., Старунова И.Н., Калугин А.А., Гальянов И.В. Исследование гистерезисных потерь при взаимодействии пневматического колёсного движителя с несущей поверхностью. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2016. № 3 (59). С. 74–77.
9. Мельник Р.В. Ефективність роботи мобільних електрифікованих засобів сільськогосподарського призначення. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація* : збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Кіровоград : КНТУ, 2016. Вип. 29. С. 202–208.

**Tretiak V.M., Oliadnichuk R.V., Kravchenko V.V., Kovalchuk Y.O., Tretiak M.K.**

#### **EXPERIMENTAL RESEARCH ON POWER DISTRIBUTION IN TRACTOR MOVEMENT ON DIFFERENT SUPPORTING SURFACES**

*The authors conducted experimental studies to determine the costs of energy for the interaction of wheels with the reference surface.*

*The article presents the results of studies of the power consumed by the movement of the tractor on various supporting surfaces: the road with asphalt, the stubble of cereals and arable land. On the tractor of the factory complete set it is quite difficult to determine the components of the power losses on its movement. Therefore, the research was carried out on an electric tractor HTZ-2511E, which was developed by the specialists of the National Scientific Center “IAEE” together with the PJSC “Kharkiv Tractor Plant”.*

*The research methodology is based on direct measurements of power consumption consumed directly by the electric motor from the battery. For this purpose, using an analog-to-digital converter, the amount of voltage was recorded on a PC, the signal of which was obtained from a parallel connected voltage divider. The value of the current was removed from the additionally installed shunt. Thus, the amount of power consumed over time was obtained by multiplying the voltage readings by the current. The measured power consumption of the tractor battery includes the following components: energy expended on the operation of the motor and the controller when converting direct current to alternating current; mechanical losses in transmission of the tractor; the power consumed by the interaction of the tires with the support surface. The analysis of the results of the experimental studies of the power consumption showed a considerable variation of the changes in the power value depending on the support surface and the air pressure in the tires. When moving on a surface that is deformed, much of the energy is spent on track formation.*

*The necessity to use equipment that would allow to control and adjust the air pressure in the tires according to the working conditions is justified.*

**Key words:** wheeled tractor, power consumption, tires, support surface, tire pressure.