

УДК 631.372

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.178-185>**М. В. Голотюк**, доц., канд. техн. наук*Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна**e-mail: m.v.holotiuk@nuwm.edu.ua*

Аналіз конструктивно-технологічних параметрів адаптивної ходової системи енергетичного засобу залежно від агрофону поля

У статті досліджено конструктивно-технологічні параметри адаптивної ходової системи мобільного енергетичного засобу та їх вплив на ефективність виконання польових сільськогосподарських робіт залежно від агрофону поля. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю підвищення продуктивності мобільних енергетичних засобів, зниження енерговитрат і мінімізації негативного впливу ходових систем на ґрунтове середовище в умовах впровадження технологій точного землеробства. Проаналізовано сучасні підходи до адаптації параметрів ходової системи залежно від фізико-механічних властивостей ґрунту, зокрема його щільності, вологості, несучої здатності та механічного складу. Метою дослідження є аналіз конструктивно-технологічних параметрів адаптивної ходової системи мобільного енергетичного засобу та визначення їх впливу на тягово-енергетичні, технологічні й агроекологічні показники роботи машинно-тракторного агрегату.

адаптивна ходова система, мобільний енергетичний засіб, параметри, тягово-зчіпні властивості, буксування, контактний тиск, ущільнення ґрунту

Постановка проблеми. Сучасний розвиток сільськогосподарського виробництва характеризується широким застосуванням високопродуктивних мобільних енергетичних засобів, які виконують основні технологічні операції під час вирощування сільськогосподарських культур. Зростання маси тракторів, самохідних машин і агрегатів, підвищення їх потужності та швидкості руху забезпечують збільшення продуктивності польових робіт, однак одночасно призводять до істотного підвищення навантаження на ґрунт. Це викликає ущільнення орного й підорного шарів, погіршення агрофізичних властивостей ґрунту, зменшення його водопроникності та аерації, збільшення питомого опору обробітку і, як наслідок, зниження врожайності сільськогосподарських культур та ефективності використання машинно-тракторних агрегатів.

Одним із перспективних напрямів вирішення зазначеної проблеми є застосування адаптивних ходових систем мобільних енергетичних засобів, здатних змінювати свої конструктивні та експлуатаційні параметри відповідно до поточного стану агрофону поля. До таких параметрів належать внутрішній тиск у шинах, площа контакту рушія з ґрунтом, навантаження на осі, тип рушія, величина буксування, розподіл маси машини та інші характеристики, що визначають взаємодію ходової системи з опорною поверхнею. Рациональна адаптація цих параметрів дозволяє зменшити контактний тиск на ґрунт, підвищити тягово-зчіпні властивості енергетичного засобу, знизити витрати палива та покращити якість виконання польових технологічних операцій.

Водночас більшість існуючих конструкцій мобільних енергетичних засобів працюють за фіксованих параметрів ходової системи, які визначаються виробником і не враховують зміни фізико-механічних властивостей ґрунту, вологості, щільності, рельєфу місцевості, агротехнологічного стану поля та виду виконуваної технологічної операції. У реальних умовах експлуатації агрофон може суттєво змінюватися навіть у межах одного поля, що призводить до нестабільності тягових характеристик, збільшення буксування рушіїв, нерівномірного розподілу навантаження між колесами, зростання енерговитрат і прискореного зношування ходової системи.

Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах впровадження технологій точного землеробства, де ефективність використання мобільних енергетичних засобів значною мірою залежить від можливості оперативної адаптації їх конструктивних параметрів до просторової неоднорідності ґрунтового середовища. Використання сучасних систем навігації, датчиків навантаження, засобів моніторингу фізичного стану ґрунту та автоматизованих систем регулювання параметрів ходової частини відкриває нові можливості для створення інтелектуальних адаптивних ходових систем, здатних забезпечувати оптимальні режими роботи машин у режимі реального часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підвищення ефективності використання мобільних енергетичних засобів у сучасному сільському господарстві є одним із ключових напрямів розвитку агроінженерії. Особливої актуальності набувають дослідження, пов'язані з удосконаленням ходових систем тракторів і самохідних машин, оскільки саме параметри їх взаємодії з ґрунтом значною мірою визначають енерговитрати, тягово-зчпні властивості, продуктивність агрегатів та рівень техногенного впливу на ґрунтове середовище. У сучасних умовах впровадження технологій точного землеробства дедалі більшого значення набуває адаптація конструктивних і експлуатаційних параметрів ходових систем до просторової неоднорідності агрофону поля [1–3].

Теоретичні та прикладні аспекти дослідження роботи мобільних енергетичних засобів широко висвітлено у працях українських учених. У роботах В. І. Кравчука, Г. А. Хайліса, А. С. Кушнар'ова, О. О. Налобіної, Є. М. Сербія та В. Г. Гусара розглянуто сучасні методики експериментальних досліджень сільськогосподарської техніки, принципи оцінювання її експлуатаційних характеристик та підходи до визначення основних технічних параметрів машин [1]. Значну увагу приділено плануванню експериментів, вибору критеріїв оцінювання та обробці результатів досліджень, що створює методичну основу для аналізу ефективності адаптивних ходових систем.

Питання конструкції тракторів, особливостей роботи ходових систем та впливу їх параметрів на експлуатаційні характеристики детально розглянуто у навчальному посібнику В. Т. Надикта, В. М. Кюрчева та С. Ф. Семененка [2]. Автори відзначають, що вибір типу рушія, розподіл навантаження між осями, параметри шин і режими роботи силової передачі істотно впливають на величину буксування, тяговий коефіцієнт корисної дії та паливну економічність мобільних енергетичних засобів.

Сучасні тенденції розвитку агроінженерії свідчать про необхідність інтеграції конструктивних рішень із цифровими технологіями керування технологічними процесами. Особлива увага приділяється автоматизованому регулюванню тиску в шинах, системам моніторингу навантаження на осі, використанню супутникової навігації та датчиків фізичного стану ґрунту, що дозволяє оперативно адаптувати параметри ходової системи до змін агрофону поля [3].

Зарубіжні дослідження також підтверджують ефективність адаптивних ходових систем. У працях J. Y. Wong [4] та M. G. Bekker [5] сформовано фундаментальні положення террамеханіки, які описують закономірності взаємодії рушіїв із

деформівним ґрунтом. Запропоновані авторами математичні моделі дозволяють визначати контактний тиск, величину осідання колеса, тягове зусилля та коефіцієнт буксування залежно від фізико-механічних властивостей ґрунту.

Останніми роками значна кількість досліджень присвячена проблемам ущільнення ґрунту під дією мобільних машин. У роботах Т. Keller, М. Lamandé, Р. Schjønning та інших дослідників доведено, що збільшення маси сучасних тракторів і комбайнів призводить до зростання контактного тиску, погіршення структури ґрунту та зниження його продуктивності [6, 7]. Автори обґрунтовують доцільність застосування систем регулювання тиску в шинах і технологій адаптивного керування ходовою частиною для зменшення ущільнення ґрунту та підвищення енергоефективності польових робіт.

Узагальнення результатів сучасних досліджень показує, що адаптація параметрів ходових систем до умов експлуатації дозволяє зменшити буксування рушіїв, підвищити тяговий коефіцієнт корисної дії, скоротити витрати палива та забезпечити рівномірніше навантаження на ґрунт [6–8]. Разом із тим більшість відомих досліджень орієнтована на аналіз окремих параметрів роботи ходової системи без комплексного врахування впливу агрофону поля, який характеризується неоднорідністю вологості, щільності, механічного складу, мікрорельєфу та агротехнічного стану.

Постановка завдання. Метою дослідження є аналіз конструктивно-технологічних параметрів адаптивної ходової системи мобільного енергетичного засобу та визначення їх впливу на ефективність виконання польових робіт залежно від агрофону поля. Для досягнення поставленої мети передбачається дослідити взаємодію ходової системи з ґрунтом, розробити математичні моделі оцінювання її роботи та визначити раціональні параметри, що забезпечують підвищення тягової ефективності, зниження енерговитрат і мінімізацію ущільнення ґрунту.

Виклад основного матеріалу. Сучасні мобільні енергетичні засоби функціонують в умовах постійної зміни фізико-механічних властивостей ґрунтового середовища, що безпосередньо впливає на ефективність виконання польових технологічних операцій. Одним із визначальних факторів, який формує експлуатаційні показники машинно-тракторного агрегату, є конструкція ходової системи та її здатність адаптуватися до змін агрофону поля. У процесі руху енергетичного засобу відбувається складна взаємодія між рушієм і ґрунтом, що супроводжується перерозподілом навантажень, деформацією поверхневого шару, виникненням контактних напружень, зміною коефіцієнта буксування та реалізацією тягового зусилля. Тому підвищення ефективності використання мобільних енергетичних засобів нерозривно пов'язане з оптимізацією конструктивно-технологічних параметрів адаптивної ходової системи.

Основними параметрами, що визначають ефективність функціонування адаптивної ходової системи, є внутрішній тиск у шинах, навантаження на передню та задню осі, площа контакту рушія з поверхнею ґрунту, геометричні розміри шин, швидкість руху агрегату та коефіцієнт буксування. Саме ці параметри визначають величину контактного тиску на ґрунт, рівень використання тягового потенціалу машини, витрати енергії та продуктивність польових робіт.

На рисунку 1 наведено узагальнену схему конструктивно-технологічних параметрів адаптивної ходової системи мобільного енергетичного засобу. Представлена схема демонструє взаємозв'язок між конструктивними характеристиками ходової системи (тиск у шинах, геометричні параметри рушія, навантаження на осі, площа контакту та швидкість руху) і основними експлуатаційними показниками, до яких належать сила тяги, коефіцієнт буксування, контактний тиск на ґрунт, питома витрата палива, продуктивність агрегату та ступінь ущільнення ґрунту.

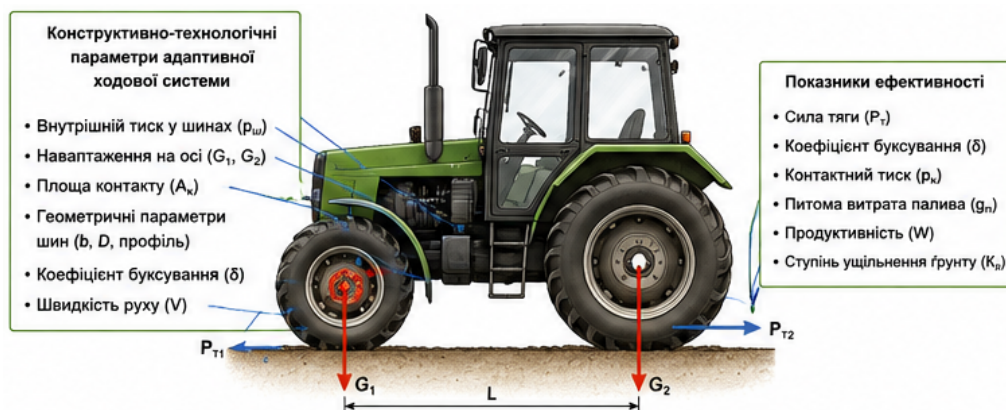


Рисунок 1 – Схема основних параметрів адаптивної ходової системи мобільного енергетичного засобу
Джерело: розроблено автором

Аналіз наведеної схеми свідчить, що зміна будь-якого із конструктивних параметрів призводить до комплексної зміни експлуатаційних характеристик машини, тому їх оптимізація повинна здійснюватися як єдина взаємопов'язана система.

Особливу увагу в дослідженні приділено процесу взаємодії рушія із ґрунтовим середовищем. На рисунку 2 наведено фізичну модель контакту колеса із ґрунтом. Під дією вертикального навантаження формується пляма контакту, у межах якої виникає нерівномірний розподіл нормальних і дотичних напружень. Одночасно відбувається деформація поверхневого шару ґрунту, що супроводжується його ущільненням та частковим зсувом у напрямку руху агрегату.

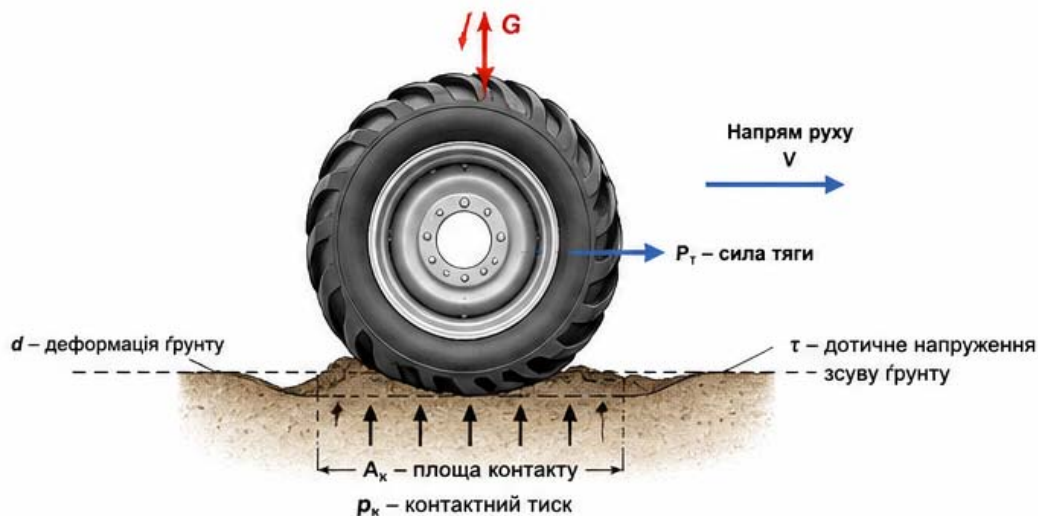


Рисунок 2 – Взаємодія рушія з ґрунтом

Джерело: розроблено автором

Саме величина площі контакту визначає питомий тиск рушія на поверхню поля. Зі збільшенням площі контакту середній контактний тиск зменшується, що сприяє зниженню ступеня ущільнення ґрунту та покращенню агрофізичних властивостей орного шару.

Одним із найбільш ефективних способів регулювання площі контакту є зміна внутрішнього тиску в шинах. Як показано на **рисунку 3**, підвищення тиску призводить до зменшення плями контакту та збільшення питомого навантаження на ґрунт. У цьому випадку покращується стійкість шини, однак суттєво зростає ризик ущільнення орного шару. Навпаки, зменшення внутрішнього тиску забезпечує збільшення площі контакту, більш рівномірний розподіл навантаження та зниження питомого тиску.

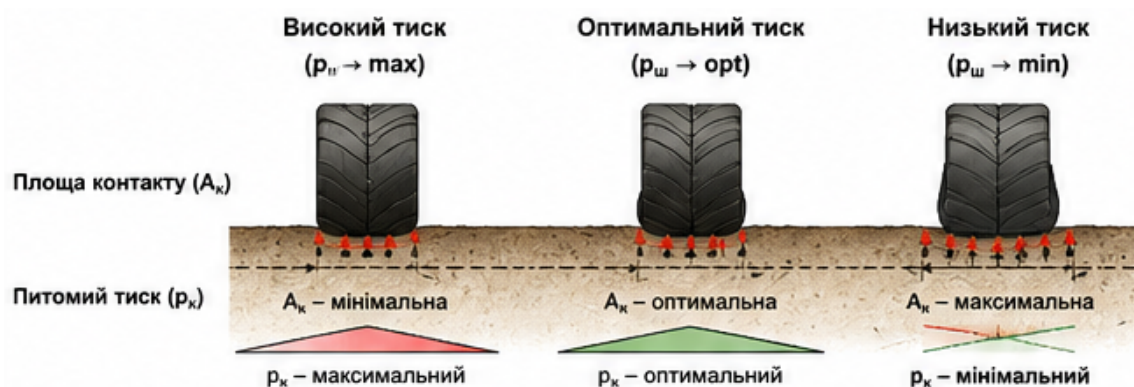


Рисунок 3 – Вплив внутрішнього тиску в шинах на площу контакту та питомий тиск на ґрунт
Джерело: розроблено автором

Разом із тим надмірне зменшення тиску може викликати підвищення опору коченню, інтенсивне нагрівання шин і збільшення витрат енергії. Отже, ефективність адаптивної ходової системи значною мірою визначається можливістю автоматичного підтримання оптимального значення тиску відповідно до поточних характеристик агрофону.

Важливим інтегральним показником ефективності функціонування мобільного енергетичного засобу є коефіцієнт буксування. Його вплив на продуктивність агрегату наведено на рисунку 4. За незначного буксування не забезпечується повне використання тягового потенціалу машини, тоді як надмірне буксування супроводжується значними втратами механічної енергії, інтенсивним руйнуванням структури ґрунту та збільшенням витрати палива. Аналіз залежності показує існування оптимальної області коефіцієнта буксування, за якої досягається максимальна реалізація сили тяги при мінімальних енергетичних втратах. Саме підтримання цього режиму є одним із головних завдань адаптивної ходової системи.

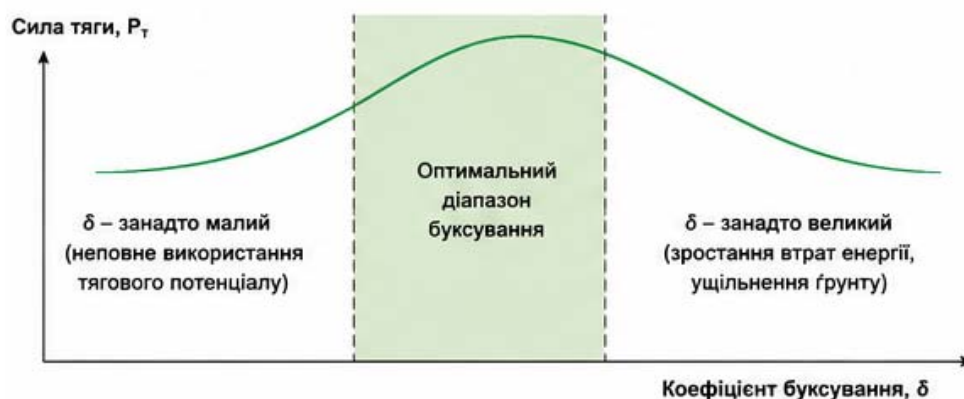


Рисунок 4 – Вплив коефіцієнта буксування на ефективність роботи агрегату
Джерело: розроблено автором

Реалізація адаптивного принципу керування можлива лише за умови використання сучасних інформаційно-вимірювальних систем. На рисунку 5 представлено структурну схему адаптивної системи керування ходовою системою мобільного енергетичного засобу. Вона включає комплекс датчиків, що здійснюють безперервний контроль внутрішнього тиску в шинах, навантаження на осі, вологості та щільності ґрунту, швидкості руху, коефіцієнта буксування й інших параметрів технологічного процесу. Інформація від датчиків надходить до електронного блока обробки, де на основі математичних моделей визначаються оптимальні параметри

функціонування ходової системи. Після цього виконавчі механізми автоматично змінюють внутрішній тиск у шинах, перерозподіляють навантаження між осями або здійснюють інші регулювальні дії. Наявність зворотного зв'язку забезпечує безперервне коригування режимів роботи залежно від зміни агрофону поля.



Рисунок 5 – Структурна схема системи адаптивного керування ходовою системою

Джерело: розроблено автором

Проведений аналіз конструктивно-технологічних параметрів адаптивної ходової системи свідчить, що їх комплексна оптимізація дозволяє істотно підвищити ефективність використання мобільних енергетичних засобів. Використання автоматизованих систем керування забезпечує зниження питомого тиску на ґрунт, зменшення коефіцієнта буксування, скорочення енерговитрат, підвищення тягової ефективності та продуктивності агрегату, а також мінімізацію негативного впливу техніки на агрофізичний стан ґрунту. Отримані результати є теоретичною основою для подальшого розроблення математичних моделей, що встановлюють кількісні залежності між параметрами адаптивної ходової системи, характеристиками агрофону поля та показниками ефективності роботи мобільного енергетичного засобу.

Висновки. У результаті проведеного дослідження виконано комплексний аналіз конструктивно-технологічних параметрів адаптивної ходової системи мобільного енергетичного засобу та встановлено їх визначальний вплив на ефективність виконання польових сільськогосподарських робіт залежно від агрофону поля. Показано, що фізико-механічні властивості ґрунту, зокрема його щільність, вологість, несуча здатність і мікрорельєф, істотно впливають на умови взаємодії рушія з опорною поверхнею, величину контактного тиску, коефіцієнт буксування, тягові характеристики та енергетичні показники мобільного енергетичного засобу.

Проаналізовано основні конструктивні параметри адаптивної ходової системи, до яких належать внутрішній тиск у шинах, площа контакту рушія з ґрунтом, навантаження на осі, геометричні параметри шин та швидкість руху агрегату. Встановлено, що їх комплексна оптимізація забезпечує більш раціональний розподіл навантаження на поверхню поля, покращує реалізацію тягового зусилля, зменшує втрати енергії на буксування та сприяє збереженню агрофізичних властивостей ґрунту.

На основі аналізу взаємодії ходової системи з агрофоном поля обґрунтовано доцільність використання адаптивного принципу керування, який передбачає автоматичне регулювання параметрів ходової частини відповідно до поточного стану ґрунтового середовища. Використання сучасних інформаційно-вимірювальних засобів, датчиків навантаження, систем контролю тиску в шинах та алгоритмів обробки даних створює передумови для реалізації інтелектуальних систем керування, здатних забезпечувати стабільні тягово-енергетичні показники в умовах змінного агрофону.

Виконаний аналіз конструктивно-технологічних схем адаптивної ходової системи та процесів взаємодії рушія із ґрунтом дозволив визначити основні напрями її

подальшого вдосконалення. Найбільш перспективними є автоматичне регулювання внутрішнього тиску в шинах, адаптивний перерозподіл навантаження між осями, оптимізація коефіцієнта буксування та використання цифрових технологій моніторингу агрофону в режимі реального часу.

Список літератури

1. Кравчук В. І., Хайліс Г. А., Кушнар'ов А. С., Налобіна О. О., Сербій Є. М., Гусар В. Г. Дослідження сільськогосподарської техніки: практикум науковцю. Дослідницьке : УкрНДПІВТ ім. Л. Погорілого, 2016. 328 с.
2. Надикто В. Т., Кюрчев В. М., Семененко С. Ф. Трактори та автомобілі : навч. посіб. Мелітополь : Люкс, 2015. 352 с.
3. Булгаков В. М., Адамчук В. В., Надикто В. Т. Механізація технологічних процесів у рослинництві : навч. посіб. Київ : Аграрна наука, 2018. 320 с.
4. Надикто В. Т. Визначення раціонального рівня енергонасиченості колісних тракторів. *Вісник аграрної науки*. 2024. № 6. С. 71–79.
5. Лебедєв А., Шуляк М., Стельмах А. Analysis of methods and devices for evaluation of the traction properties tractor. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування*. 2022. № 2. С. 108–117.
6. Голуб Г., Чуба В., Ачкєвич В., Крушельницький В., Цивєнкова Н. Modeling of the running system pressure on the soil depending on the structural parameters of the tractors. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 69.
7. Лебедєв С., Коробко А. Тягові властивості трактора при використанні баластування. *Сільськогосподарська техніка та обладнання: прогнозування, конструювання, випробування*. 2020. Вип. 26(40). С. 66–73.
8. Яковенко А., Макарчук В., Сєрбінов В. Вибір режиму роботи машинно-тракторних агрегатів. *Аграрний вісник Причорномор'я*. 2019. Вип. 94. С. 117–121.

References

1. Kravchuk, V. I., Khailis, H. A., Kushnarov, A. S., Nalobina, O. O., Serbii, Ye. M., & Husar, V. H. (2016). *Research on Agricultural Machinery: A Practical Guide for Scientists*. Doslidnytske: L. Pogorilly Ukrainian Research Institute of Forecasting and Testing of Machinery and Technologies for Agricultural Production. [in Ukrainian].
2. Nadykto, V. T., Kiurchev, V. M., & Semenenko, S. F. (2015). *Tractors and Automobiles*. Melitopol: Liuks. [in Ukrainian].
3. Bulhakov, V. M., Adamchuk, V. V., & Nadykto, V. T. (2018). *Mechanization of Technological Processes in Crop Production*. Kyiv: Ahrarna nauka. [in Ukrainian].
4. Nadykto, V. T. (2024). Determination of the rational power saturation level of wheeled tractors. *Visnyk ahrarnoi nauky* (Bulletin of Agricultural Science), (6), 71–79. [in Ukrainian].
5. Lebediev, A., Shuliak, M., & Stelmakh, A. (2022). Analysis of methods and devices for evaluation of the traction properties of a tractor. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automobile and Tractor Engineering*, (2), 108–117. [in Ukrainian].
6. Holub, H., Chuba, V., Achkevych, V., Krushelnyskyi, V., & Tsyvenkova, N. (2023). Modeling of the running system pressure on the soil depending on the structural parameters of the tractors. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 69, 365–376.
7. Lebediev, S., & Korobko, A. (2020). Traction characteristics of a tractor using ballast. *Agricultural Machinery and Equipment: Forecasting, Design and Testing*, 26(40), 66–73. [in Ukrainian].
8. Yakovenko, A., Makarchuk, V., & Serbinov, V. (2019). Selection of the operating mode of machine-and-tractor units. *Agrarian Bulletin of the Black Sea Region*, 94, 117–121. [in Ukrainian].

Mykola Holotiuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine

Analysis of Structural and Technological Parameters of the adaptive Running System of the Energy Vehicle Depending on the agRo Background of the Field

The article examines the structural and technological parameters of the adaptive running system of a mobile energy vehicle and their influence on the efficiency of field agricultural work depending on the agro

background of the field. The relevance of the study is due to the need to increase the productivity of mobile energy vehicles, reduce energy consumption and minimize the negative impact of running systems on the soil environment in the context of the introduction of precision agriculture technologies. Modern approaches to adapting the running system parameters depending on the physical and mechanical properties of the soil, in particular its density, humidity, bearing capacity and mechanical composition, are analyzed. The purpose of the study is to analyze the structural and technological parameters of the adaptive running system of a mobile energy vehicle and determine their influence on traction and energy, technological and agroecological indicators of the machine-tractor unit.

To achieve the goal, the methods of analysis and generalization of scientific sources, system analysis, elements of terramechanics and mechanics of interaction of movers with the soil were used. In the work, it was established that the internal pressure in the tires, the contact area of the driver with the ground, the load distribution between the axles, the skid coefficient and the speed of the unit have the greatest influence on the efficiency of the operation of the mobile energy vehicle. The conducted analysis confirmed that the adaptive regulation of these parameters ensures a decrease in the specific pressure on the soil, improvement of the traction and traction characteristics, an increase in the coefficient of use of the traction force and a decrease in the specific fuel consumption. Structural diagrams of the interaction of the running system with the soil environment have been developed, which reflect the relationship between structural parameters, physical and mechanical properties of the agricultural background of the field and indicators of the efficiency of the unit.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of their use during the design of promising adaptive running systems of tractors and self-propelled machines, improvement of precision farming technologies and the creation of automated control systems for mobile energy means. The proposed approach helps increase the efficiency of field work, preserve soil fertility, and develop intelligent systems for managing agricultural machinery.

adaptive running system; mobile power tool; parameters; traction and adhesion properties; skid; contact pressure; soil compaction

Одержано (Received) 17.06.2026

Прорецензовано (Reviewed) 20.06.2026

Прийнято до друку (Approved) 22.06.2026

УДК 631.312; 631.316.22

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.185-198>

С. М. Лещенко, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м Кропивницький, Україна

e-mail: leshchenkosm@kntu.kr.ua

Технологічна модель глибокого розпушування ґрунту

В роботі розглянуто технологічну модель глибокого розпушування ґрунту чизельними робочими органами, яка об'єднує фізико-механічний, енергетичний і структурно-функціональний рівні взаємодії знаряддя з ґрунтом. В роботі запропоновано аналітичний зв'язок між критичною глибиною розпушування та інтенсивністю стохастичного марківського процесу подрібнення ґрунту через безрозмірний коефіцієнт відносної глибини і функцію частки корисної енергії. Отримана на цій основі залежність ступеня кришення ґрунту теоретично пояснює, чому раціональна робоча глибина перебуває в межах критичної глибини, а не наближається до максимально можливої і узгоджується з відомим експериментальним фактом зниження ступеня подрібнення ґрунту чизельними знаряддями при перевищенні раціональної глибини обробітку.

чизельний робочий орган, глибоке розпушування ґрунту, технологічна модель, критична глибина, тяговий опір, ступінь кришення ґрунту