

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ХОМА ВІТАЛІЙ ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 629.113

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПІДВИЩЕННЯ ПРОХІДНОСТІ ПОВНОПРИВОДНИХ АВТОМОБІЛІВ
РОЗДІЛЬНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ТИСКУ У ШИНАХ**

Галузь знань 13 – Механічна інженерія
133 – Галузеве машинобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Віталій ХОМА

Науковий керівник:

Крайник Любомир Васильович,
доктор технічних наук, професор

Львів 2026

АНОТАЦІЯ

Хома В.В. Підвищення прохідності повноприводних автомобілів роздільним регулюванням тиску у шинах – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» (13 – Механічна інженерія). – Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, Львів, 2026.

Прохідність у складних дорожніх умовах за відсутності твердого покриття є визначальною характеристикою колісних транспортних засобів для військової сфери, екстрених служб, енергетики, будівництва, сільського та лісового господарств, оскільки забезпечує виконання транспортних та технологічних завдань. Наявний в Україні парк повноприводних автомобілів, що складається переважно з моделей радянського виробництва (ГАЗ, ЗиЛ, Урал, КамАЗ) є технічно застарілим, бо очевидно, що розробки середини ХХ століття з точки зору прохідності суттєво відстають від сучасних зарубіжних аналогів у країнах ЄС. В умовах повномасштабної агресії Росії проти України питання оновлення парку автомобілів підвищеної прохідності стало дедалі гострішим і дана тенденція збережеться ще протягом багатьох років після закінчення війни, оскільки розмінування та відновлення дорожньої інфраструктури це тривалий і кропіткий процес. Виходячи з цього, перед вітчизняним автомобілебудуванням постає завдання відійти від науково-технічних напрацювань радянського періоду та запропонувати натомість перспективні рішення і методики, що дозволять скоротити наявне технічне відставання від країн НАТО.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-прикладної задачі підвищення прохідності (мобільності) повноприводних автомобілів в умовах бездоріжжя шляхом роздільного регулювання тиску повітря в шинах з урахуванням характеристик автомобіля та фізико-механічних властивостей ОП. Основна увага зосереджена на кількісному зв'язку між тиском у шинах і максимально можливою швидкістю руху бездоріжжям.

У першому розділі автором проведено огляд і аналіз нормативних документів, наукових праць та методик у сфері оцінки опорно-зчіпної прохідності повноприводних КТЗ за останні десятиліття. Доведено важливість прохідності повноприводних КТЗ багатоцільового призначення виходячи з завдань, що перед ними поставлені та умов в яких вони виконуються. Розглянуто розвиток террамеханіки та сформовані на її основі підходи до оцінки прохідності в межах «Східної» (СРСР/РФ) та «Західної» (США/НАТО) наукових шкіл. Детально проаналізовано методи VCI, MN, MMP, VLCI, їхні переваги, обмеження та області застосування.

Представлені методи оцінки прохідності в країнах НАТО базуються на емпіричних залежностях, тому отримання достовірних результатів розрахунків і аналізу залежить від того чи всі величини подаються у визначених одиницях виміру, чи конструктивні рішення транспортних засобів і їх ходових систем та параметри ґрунту, по якому здійснюватиметься рух, не мають значних відмінностей від параметрів при яких проводилися випробування. Точність оцінки прохідності та тягового зусилля значною мірою залежить від якості прийнятої моделі показника прохідності, оскільки неоднорідність ґрунту та широкий діапазон змін його параметрів унеможливають створення універсальної моделі. З огляду на наявні дані, надійним методом оцінки наявних тягових зусиль на глинистих ґрунтах наразі є метод VCI. Також надійним методом, що базується на емпіричних даних та підтверджений оцінкою прохідності та є модель MMP — з чітко визначеним та вузьким діапазоном застосування на момент її створення.

Щодо показників оцінки прохідності які пропонуються радянськими науковцями слід констатувати, що деякі з них за своїм фізичним змістом являють собою запас питомої сили тяги або питомої потужності, що дозволяє провести порівняльну оцінку прохідності декількох автомобілів при русі по конкретній ділянці місцевості, разом з тим, їх незручно використовувати при порівняльній оцінці прохідності в різних ґрунтових умовах. Решта показників оцінюють прохідність машин по відношенню максимального тиску до середнього тиску а також глибині занурення, що є дуже важливо, проте їх застосування при

порівняльній оцінці декількох автомобілів досить проблематично, так як вони є непрямими і не дають прямої оцінки прохідності.

В результаті проведеного огляду і аналізу також було встановлено, що питання впливу роздільного регулювання тиску в шинах на показники прохідності недостатньо висвітлене у відомих на сьогодні наукових працях, що обґрунтовує доцільність подальших досліджень. При зниженні тиску повітря в шинах зменшується тиск на ґрунт, збільшується площа плями контакту, зменшується глибина утвореної колії, водночас зростає деформація шини, що тягне за собою збільшення втрат на внутрішнє тертя в оболонці шини, також зменшується максимально допустима швидкість руху та знижується ресурс шини. Тому в залежності від фізико-механічних характеристик ОП існують оптимальні значення тиску повітря в шинах. Через неоднорідність ґрунту та різне вертикальне навантаження на осі автомобіля умови взаємодії з ОП для кожного колеса відрізняються і зазвичай колеса другої і наступних осей рухаються вже по зміненому колесами передньої осі ґрунту, який відрізняється більшою щільністю. В результаті цього деформація та відповідно радіуси кочення передніх і задніх коліс є різними. Звідси випливає, що виникає певний запас по тяговому зусиллі на кожній з наступних осей, який нажалі нівелюється системою централізованого регулювання тиску в шинах. Тому, забезпечення оптимального для кожного колеса значень тиску в шинах може бути ефективним інструментом підвищення прохідності колісних автомобілів.

У підсумку можна констатувати необхідність подальших досліджень з метою встановлення оптимального тиску в шинах залежно від типу місцевості, а також розробки засобів підтримання цього тиску автоматично, без урахування досвіду водія.

У **другому** розділі розглянуто декілька математичних моделей взаємодії колеса з ОП, що деформується. В аналітичних методах існують труднощі з правильним визначенням граничних умов на межі «ґрунт-шина», що вимагає комплексного моделювання. Такі моделі потребують фундаментальних інженерних властивостей ґрунту для встановлення залежності між напруженням та

деформацією, а також визначення критерію текучості. Необхідно розробити методіку для вимірювання цих фундаментальних властивостей ґрунту безпосередньо на місці. Напівемпіричні методи досить точно прогнозують роботу гусениць та жорстких коліс, проте потрібно вдосконалити застосування цих методів для прогнозування поведінки гнучких шин на деформованих поверхнях. Емпіричні підходи довели свою ефективність у прогнозуванні тягових характеристик, більшість цих моделей на основі показника прохідності розроблені в США та європейських країнах з урахуванням їхніх місцевих умов. Основним параметром міцності ґрунту є CI , який є відносно простим інструментом для використання в прогнозуванні зчеплення. Проте, як зазначається, діапазон застосовуваності цих параметрів обмежений випадками, схожими на ті, на основі яких були розроблені відповідні рівняння. Це підтверджується результатами досліджень різних авторів, які підбирали константи у емпіричних рівняннях методом апроксимації для підвищення точності прогнозу. Застосовувати ці моделі слід обережно, особливо при оцінці нових ситуацій або нових типів шин.

За результатами дослідження, моделі Wismer and Luth та Gee-Clough виявилися такими, що переоцінюють тяговий потенціал шин у піщано-глинистому ґрунті. Найпоширенішими і затвердженими стандартом ASAE D230.4 є тягові рівняння, розроблені Brixius. Тому, було проведено аналіз існуючих моделей оцінки тягової ефективності шин, що базуються на основі рівнянь Brixius. З використанням програмного забезпечення MATLAB Simulink розроблено модифіковану модель для точного прогнозування тяги колісних транспортних засобів при роздільному регулюванні тиску в шинах в найпоширеніших в Україні ґрунтових умовах.

За основу для імітаційної моделі обрано залежності запропоновані Brixius, оскільки вони демонструють найкращу збіжність з результатами польових досліджень та є точнішими на ґрунтах, що поширені на території України. Обрані залежності удосконалено з точки зору впливу регулювання тиску та радіальної деформації шини, що дозволяє точніше визначати показники взаємодії колеса з ОП, а саме: коефіцієнт зчеплення, коефіцієнт опору рухові та глибину утвореної колії.

Імітаційну модель реалізовано в програмному середовищі MATLAB Simulink. Вперше в межах єдиної моделі враховано можливість незалежної зміни тиску повітря в шинах окремих коліс і осей.

У **третьому** розділі виконано комплексну оцінку впливу конструктивних параметрів повноприводних автомобілів та режимів регулювання тиску в шинах на показники руху бездоріжжям. Дослідження проведено для транспортних засобів із колісними схемами 4×4, 6×6 та 8×8 у широкому діапазоні повних мас на прикладі автомобілів УАЗ-469, КамАЗ-4310, КрАЗ-5233, КрАЗ-6322 та БТР-4. Розрахунки виконано з урахуванням розподілу навантаження по осях, окремого регулювання тиску в шинах кожної осі та впливу ущільнення ґрунту. Оцінювання здійснювалося за коефіцієнтами опору руху, зчеплення та інтегральними показниками прохідності VCI і MMP. Встановлено, що зменшення тиску в шинах призводить до одночасного зниження коефіцієнта опору руху, зростання коефіцієнта зчеплення і зменшення питомого тиску на опорну поверхню внаслідок збільшення площі контакту колеса з ґрунтом. Показано, що підвищення тиску на кожні 10 кПа спричиняє збільшення опору руху на 0,5–3,2 % залежно від колісної формули автомобіля і навантаження на вісь. Найбільша чутливість до регулювання тиску спостерігається на важких багатовісних транспортних засобах.

Аналіз інтегральних показників прохідності підтвердив, що зниження тиску в шинах має позитивний вплив на значення VCI та MMP для всіх досліджених компоновок, причому ефект зростає зі збільшенням кількості ведучих осей, що свідчить про синергетичний вплив колісної схеми та регулювання тиску. Встановлено також тенденцію до вирівнювання опору руху між осями автомобілів із нерівномірним розподілом навантаження, що пояснюється перерозподілом контактних напружень у плямі контакту. Обґрунтовано раціональний діапазон регулювання тиску в шинах на рівні 40–60 % від номінального значення, у якому забезпечується компроміс між зменшенням енергетичних втрат, підвищенням зчеплення та збереженням ресурсу шин. Також проаналізовано взаємозв'язок регулювання тиску в шинах із мобільністю автомобіля на бездоріжжі. Показано, що показники VCI та MMP характеризують потенційну прохідність, тоді як

швидкість руху відображає реалізовану мобільність транспортного засобу. Запропоновано використовувати швидкість руху поряд із VCI та MMP як інтегральний критерій оцінювання ефективності руху, що дозволяє перейти від оцінки граничної прохідності до комплексного аналізу мобільності автомобіля в реальних ґрунтових умовах. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування параметрів систем роздільного регулювання тиску в шинах та вибору раціональних режимів експлуатації повноприводних автомобілів на слабких ґрунтах.

У **четвертому** розділі розроблено методику та експериментальне забезпечення дослідження прохідності повноприводних автомобілів, спрямоване на перевірку результатів теоретичних досліджень, оцінку адекватності імітаційної моделі руху і експериментальне обґрунтування методу роздільного регулювання тиску повітря в шинах. Методика сформована на основі стандартів оцінювання прохідності та доповнена параметрами, необхідними для аналізу взаємодії рушія з ОП, що деформується. Як основні показники прохідності використано максимальну швидкість руху, глибину колії, конусний індекс транспортного засобу (VCI) за методикою WES та максимальний середній тиск на ґрунт (MMP). Вимірювання здійснювалися із застосуванням синхронізованого вимірювального комплексу, що забезпечував безперервну реєстрацію параметрів руху, стану ґрунту та режимів роботи шин. Польові експерименти виконано на трьох типах бездоріжжя (сухий пісок, супісок, легкий суглинок) із попереднім визначенням фізико-механічних характеристик ОП.

На першому етапі проведено експериментальну перевірку методики WES на автомобілях КрАЗ-5233 та КамАЗ-4310. Встановлено, що швидкість руху КрАЗ-5233 перевищує аналогічний показник для КамАЗ-4310 на 10–15 % попри більше навантаження на осі, що підтверджує суттєвий вплив параметрів силового приводу, трансмісії та шин на прохідність. Отже, виникає необхідність уточнення традиційних критеріїв оцінювання прохідності з урахуванням розподілу навантажень і характеристик колісного рушія.

Другий етап досліджень присвячено експериментальній перевірці модифікованої методики оцінювання прохідності з урахуванням роздільного регулювання тиску в шинах на автомобілі УАЗ-469. Диференційований підбір тиску для передньої та задньої осей дозволяє врахувати зміну властивостей ґрунту після проходження передніх коліс і забезпечує більш повну реалізацію тягово-зчіпного потенціалу колісного рушія. Експериментально підтверджено підвищення максимальної швидкості руху бездоріжжям у середньому на 15–20 %, а також покращення показників VCI та MMR, що свідчить про зниження енергетичних втрат і підвищення ефективності взаємодії шини з ґрунтом.

На основі порівняння результатів натурних випробувань та результатів імітаційного моделювання було доведено адекватність розробленої математичної моделі руху повноприводного автомобіля бездоріжжям, що підтверджується близькістю експериментальних і розрахункових значень показників прохідності та максимальної швидкості руху. За результатами досліджень сформульовано практичні рекомендації щодо підвищення прохідності повноприводних автомобілів. Раціональний розподіл тиску передбачає збільшення тиску в шинах задньої осі відносно передньої при русі бездоріжжям, що забезпечує зменшення питомого тиску на ґрунт, стабілізацію тягових властивостей і підвищення швидкості руху без втрати керованості.

У **загальних висновках** узагальнено результати теоретичних і експериментальних досліджень, підтверджено досягнення поставленої мети а також сформульовано напрями подальших досліджень у сфері підвищення прохідності колісних транспортних засобів.

Ключові слова: адаптивне керування, військовий автомобіль, динаміка, колісна машина, повний привід, колісний рушій, шина, прохідність бездоріжжям, деформація опорної поверхні, несуча здатність, ущільнення ґрунту, коефіцієнт опору руху, коефіцієнт зчеплення, тягове зусилля, крутний момент, швидкість руху, математична модель, понижений тиск, тиск на ґрунт, трансмісія, твердість ґрунту, робочий шар, конусний індекс.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Грубель М., Крайник Л., Хома В. Імітаційне моделювання руху колісної військової автомобільної техніки бездоріжжям та оцінка його адекватності. *Автошляховик України*. 2020. №2 (2020). С. 21-28 <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2020-2-262-21-28> (Дисертантом розроблено імітаційну модель руху військової автомобільної техніки бездоріжжям)

2. Худавердян Г., Хома В., Крайник Л. Імітаційне моделювання руху полем повноприводної колісної техніки у програмному середовищі MATLAB Simulink. *Вісник ЛНУП. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2023. №26. С. 164–170. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2022.26.164> (Дисертантом розроблено імітаційну модель руху повноприводної колісної техніки полем для транспортного і технологічного режимів)

3. Хома В. Ефективність роздільного регулювання тиску в шинах з умов прохідності та мобільності руху бездоріжжям. *Вісник ЛНУП. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2024. №27. С. 22–26.

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.022> (Дисертантом представлено доопрацьовану імітаційну модель руху повнопривідних колісних транспортних засобів бездоріжжям з врахуванням централізованого та роздільного регулювання тиску в шинах та проведено оцінку його ефективності)

4. Манзяк М., Хома В., Грубель М., Крайник Т. Удосконалення методики оцінки плавності ходу для автомобіля підвищеної прохідності. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2024. №1(22). С. 233-243. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1365> (Дисертантом розроблено двомірну математичну модель двовісного автомобіля підвищеної прохідності з урахуванням характеристик передньої та задньої підвісок і шин, мікропрофілю і фізико-механічних характеристик ґрунту)

5. Hrubel, M., Kraynyk, L., Mikhalieva, M., Zalyпка, V., Manziak, M., Khoma, V., Lanets, O., Ruban, D., Andriienko, A., & Kokhan, V. Improving a methodology for estimating the cross-country ability of all-wheel-drive vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. №2(128). P. 64–72. (SCOPUS) <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.302833> (Дисертантом запропоновано вдосконалену модель *Simulink* для руху повнопривідного транспортного засобу позашляховими дорогами для визначення максимальної швидкості руху та інших параметрів прохідності на основі емпіричних даних)

6. Хома В. Експериментальні дослідження впливу роздільного регулювання тиску в шинах на показники опорної прохідності автомобільної техніки. *Вісник ЛНУП. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2025. №29. С. 64–69. <https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.64-69> (Дисертанту належить розробка методики та експериментального забезпечення дослідження прохідності повнопривідних автомобілів, спрямоване на перевірку результатів теоретичних досліджень, оцінку адекватності імітаційної моделі руху та експериментальне обґрунтування методу роздільного регулювання тиску повітря в шинах)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Хома. В. Мобільність автомобіля в умовах бездоріжжя. *Проблеми з транспортними потоками і напрями їх розв'язання*: матеріали IV Всеукраїнської конференції (Львів, 25-26 березня 2021 р.). Львів: Галицька видавнича спілка, 2021. С. 111-112. (Дисертантом розроблено математичну модель коливань підресореної маси автомобіля при русі бездоріжжям)

8. Хома В., Крайник Л. Підвищення прохідності колісної автотехніки раціональним регулюванням тиску повітря в шинах. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки*. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції (Львів, 14 травня 2021 р.). Львів: НАСВ, 2021. С. 67. (Дисертантом

обґрунтовано раціональні діапазони регулювання тиску повітря у шинах для підвищення прохідності колісних транспортних)

9. Хома В. Роздільне регулювання тиску в шинах повноприводних автомобілів. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту: матеріали X-ї Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції (м. Вінниця 14-15 квітня 2022 р.)* Вінниця: ВНТУ, 2022. С. 304-306. *(Дисертантом за результатами моделювання руху повноприводного автомобіля визначено оптимальний розподіл тиску в шинах по осях та обґрунтовано доцільність роздільного регулювання тиску)*

10. Худавердян Г.А., Хома В.В. Технологічні процеси обробітку ґрунту: комп'ютерне моделювання. *Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем: матеріали III Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції (м. Рівне 19-20 жовтня 2022р.)* Рівне: НУВГП, 2022. 301с. Електронне видання. *(Дисертантом розроблено імітаційну модель руху універсального повнопривідного колісного транспортного засобу в середовищі MATLAB Simulink з урахуванням взаємодії «колесо–ґрунт» та технологічного навантаження)*

11. Манзяк М., Хома В., Грубель М. Оцінка плавності руху колісної військової автомобільної техніки в умовах бездоріжжя. *Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту: матеріали XI-ї Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції (м. Вінниця 13-14 квітня 2023 р.)*. Вінниця: ВНТУ, 2023. С. 221-224. *(Дисертанту належить аналіз конструкцій підвісок колісної військової автомобільної техніки та чинних міжнародних і національних стандартів у сфері оцінки плавності руху)*

12. Хома В., Крайник Л. Вплив регулювання тиску повітря в шинах на взаємодію з опорною поверхнею. *Актуальні проблеми сучасної науки: теоретичні та практичні дослідження молодих учених: матеріали I-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції (м. Полтава 26-27 квітня 2023 р.)* Полтава: ПДАУ, 2023. С. 73-75 *(Дисертантом проаналізовано взаємодію шини з опорною поверхнею та проведено імітаційне моделювання руху шини ИД-370 на сухому піску)*

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

13. Грубель М., Фтемов Ю., Хома В. Експериментальні дослідження параметрів опорної прохідності зразків колісної військової автомобільної техніки. *Системи озброєння та військова техніка*. 2019. № 4(60). С. 7-15. <https://doi.org/10.30748/soivt.2019.60.01> (Дисертантом у межах роботи забезпечено участь у розробленні та застосуванні автоматизованого контрольо-вимірювального комплексу для реєстрації параметрів руху зразків колісної військової автомобільної техніки)

14. Грубель М., Манзяк М., Хома В., Ланець О., Андрієнко А. Імітаційне моделювання мобільності колісної військової автомобільної техніки за умов руху бездоріжжям. *Військово-технічний збірник НАСВ*. 2023. №28. С. 10–17. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023.10-17> (Дисертантом виконано оцифрування тестового треку Daimler (базового еталонного випробувального покриття) та підготовку вихідних даних для імітаційного моделювання руху колісної військової автомобільної техніки)

Патенти

15. Кохан В.Ф., Крайник Л. В., Грубель М. Г., Манзяк М. О., Хома В. В. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на науково-практичний твір «Спосіб оцінки прохідності колісної військової техніки» № 116929 від 09.03.2023 р.

ABSTRACT

Khoma V.V. Improving the cross-country mobility of all-wheel-drive vehicles by means of independent tire pressure control – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy Specialty 133 "Industrial Mechanical Engineering" (Field of Knowledge 13- Mechanical Engineering). Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnology named after S.Z. Gzhytsky, Lviv, 2026.

Cross-country mobility under difficult road conditions in the absence of a hard surface is a determining characteristic of wheeled vehicles for military applications, emergency services, energy, construction, agriculture, and forestry, as it ensures the fulfillment of transport and technological tasks. The existing fleet of all-wheel-drive vehicles in Ukraine, which mainly consists of Soviet-produced vehicles (GAZ, ZiL, Ural, KamAZ), is technically outdated, as it is evident that all-wheel-drive vehicles developed in the mid-20th century significantly lag behind modern foreign counterparts in EU countries in terms of mobility. Under the conditions of the full-scale aggression of Russia against Ukraine, the issue of renewing the fleet of high-mobility vehicles has become increasingly urgent, and this trend will persist for many years after the end of the war, since demining and restoration of road infrastructure are long and labor-intensive processes. Based on this, the domestic automotive industry faces the task of moving away from the scientific and technical developments of the Soviet period and instead proposing advanced solutions and methodologies that will reduce the existing technological gap with NATO countries.

The dissertation is devoted to solving a scientific and applied problem of improving the cross-country mobility of all-wheel-drive vehicles under off-road conditions by means of independent tire pressure control, taking into account vehicle characteristics and the physical and mechanical properties of the supporting surface. The main focus is placed on the quantitative relationship between tire pressure and the maximum achievable off-road speed.

In the **first chapter**, the author carried out a review and analysis of regulatory documents, scientific works, and methodologies in the field of evaluating the traction–support mobility of all-wheel-drive wheeled vehicles over recent decades. The importance of mobility of multi-purpose all-wheel-drive wheeled vehicles is substantiated based on the tasks assigned to them and the conditions in which they are performed. The development of terramechanics and the approaches formed on its basis within the “Eastern” (USSR/RF) and “Western” (USA/NATO) scientific schools are considered. The VCI, MN, MMP, and VLCI methods, their advantages, limitations, and application areas are analyzed in detail.

The presented mobility assessment methods in NATO countries are based on empirical relationships; therefore, obtaining reliable calculation and analysis results depends on whether all quantities are expressed in the specified units of measurement, and whether the design solutions of vehicles and their running systems, as well as the parameters of the soil on which movement is performed, do not significantly differ from those under which the tests were conducted. The accuracy of evaluating mobility capability and tractive effort largely depends on the quality of the adopted mobility indicator model; soil heterogeneity and the wide range of variation of its parameters make it impossible to create a universal model. Based on the available data, the VCI method is currently a reliable method for assessing available tractive effort on clay soils. The MMP model is also a reliable method based on empirical data and confirmed by mobility assessment, with a clearly defined and limited range of applicability at the time of its development.

Regarding the mobility indicators proposed by Soviet researchers, it should be noted that some of them, in their physical meaning, represent a reserve of specific tractive force or specific power, which allows comparative evaluation of the mobility of several vehicles when moving over a specific terrain section; at the same time, they are inconvenient for comparative evaluation under different soil conditions. Other indicators evaluate vehicle mobility based on the ratio of maximum to average ground pressure, as well as rut depth, which is very important; however, their application for comparative

evaluation of several vehicles is rather problematic, as they are indirect and do not provide a direct assessment of mobility.

As a result of the review and analysis, it was also established that the issue of the influence of independent tire pressure control on mobility indicators is insufficiently covered in currently available scientific works, which substantiates the feasibility of further research. When tire pressure decreases, ground pressure decreases, the contact patch area increases, and rut depth decreases; at the same time, tire deformation increases, which leads to an increase in internal friction losses in the tire carcass, the maximum allowable speed decreases, and tire life is reduced. Therefore, depending on the physical and mechanical characteristics of the supporting surface, there are optimal values of tire pressure. Due to soil heterogeneity and different vertical loads on the vehicle axles, the conditions of interaction with the supporting surface differ for each wheel, and typically the wheels of the second and subsequent axles move on soil already modified by the wheels of the front axle, which is characterized by higher density. As a result, deformation and, accordingly, the rolling radii of the front and rear wheels differ; hence, a certain reserve of tractive effort arises on each subsequent axle, which, however, is leveled by centralized tire pressure control systems. Therefore, ensuring optimal tire pressure values for each wheel can be an effective tool for improving the mobility of wheeled vehicles.

In summary, it can be stated that further research is required to determine optimal tire pressure depending on terrain type, as well as to develop means for automatically maintaining this pressure without relying on driver experience.

In the **second chapter**, several mathematical models of wheel interaction with a deformable supporting surface are considered. Analytical methods face difficulties in correctly determining boundary conditions at the “soil–tire” interface, which requires complex modeling. Such models require fundamental engineering properties of the soil to establish stress–strain relationships and determine the yield criterion. It is necessary to develop methods for measuring these fundamental soil properties directly in situ.

Semi-empirical methods quite accurately predict the performance of tracks and rigid wheels; however, the application of these methods for predicting the behavior of pneumatic tires on deformable surfaces requires improvement. Empirical approaches

have proven their effectiveness in predicting traction characteristics; most of these models based on mobility indicators have been developed in the USA and European countries considering their local conditions.

The main parameter of soil strength is the cone index, which is a relatively simple tool for use in traction prediction. However, as noted by Wong, the applicability range of these parameters is limited to cases similar to those on the basis of which the corresponding equations were derived. This is confirmed by studies of various authors who adjusted constants in empirical equations using approximation methods to improve prediction accuracy. These models should be applied with caution, especially when evaluating new conditions or new types of tires.

According to the results of study, the models of Wismer and Luth and Gee-Clough tend to overestimate the traction potential of tires on sandy-clay soils. The most widespread and ASAE-approved traction equations are those developed by Brixius. Therefore, an analysis of existing models for evaluating tire traction efficiency was carried out, and based on the Brixius equations, using MATLAB Simulink software, a modified model was developed for accurate prediction of traction of wheeled vehicles under independent tire pressure control in the most common soil conditions of Ukraine.

The Brixius relationships were taken as the basis for the simulation model, as they demonstrate the best agreement with field research results and provide higher accuracy for soils typical of Ukraine. The selected relationships were improved in terms of accounting for the influence of tire pressure regulation and radial tire deformation, which allows more accurate determination of wheel–soil interaction indicators, namely: traction coefficient, motion resistance coefficient, and rut depth. The simulation model was implemented in the MATLAB Simulink environment. For the first time, within a unified model, the possibility of independent variation of tire pressure for individual wheels and axles was taken into account.

In the **third chapter**, a comprehensive assessment of the influence of design parameters of all-wheel-drive vehicles and tire pressure control modes on off-road performance indicators was carried out. The study was conducted for vehicles with 4×4, 6×6, and 8×8 wheel configurations over a wide range of gross masses using the examples

of UAZ-469, KamAZ-4310, KrAZ-5233, KrAZ-6322, and BTR-4 vehicles. The calculations were performed taking into account axle load distribution, independent tire pressure control for each axle, and the influence of soil compaction. The evaluation was carried out using motion resistance coefficients, traction coefficients, and integral mobility indicators VCI and MMP.

It was established that a decrease in tire pressure leads to a simultaneous decrease in motion resistance coefficient and an increase in traction coefficient due to an increase in the contact area between the wheel and the soil and a decrease in specific ground pressure. It is shown that an increase in pressure by 10 kPa leads to an increase in motion resistance by 0.5–3.2% depending on the vehicle wheel configuration and axle load. The highest sensitivity is observed in heavy multi-axle vehicles. The analysis of integral mobility indicators confirmed that reducing tire pressure increases VCI and MMP values for all studied configurations, and the effect increases with the number of driven axles, indicating a synergistic effect of multi-axle configuration and pressure control. A tendency to equalize motion resistance between axles of vehicles with uneven load distribution was also established, which is explained by the redistribution of contact stresses in the contact patch. A rational tire pressure regulation range of 40–60% of the nominal value was substantiated, in which a compromise is achieved between reducing energy losses, increasing traction, and maintaining tire life. The relationship between tire pressure control and vehicle mobility under off-road conditions was also analyzed. It is shown that VCI and MMP characterize potential mobility, while vehicle speed reflects the realized mobility of the vehicle. It is proposed to use vehicle speed along with VCI and MMP as an integral criterion for evaluating motion efficiency, which allows transitioning from assessing limiting mobility to a comprehensive analysis of vehicle mobility under real soil conditions. The obtained results can be used to justify the parameters of independent tire pressure control systems and to select rational operating modes for all-wheel-drive vehicles on weak soils.

In the **fourth chapter**, a methodology and experimental framework for studying the mobility of all-wheel-drive vehicles were developed, aimed at verifying theoretical results, assessing the adequacy of the simulation model, and experimentally

substantiating the method of independent tire pressure control. The methodology was formed based on mobility evaluation standards and supplemented with parameters necessary for analyzing wheel–soil interaction. The main mobility indicators used were maximum vehicle speed, rut depth, vehicle cone index (VCI) according to the WES methodology, and maximum mean pressure (MMP). Measurements were carried out using a synchronized measurement system that ensured continuous recording of motion parameters, soil condition, and tire operating modes. Field experiments were conducted on three types of off-road terrain (dry sand, sandy loam, light loam) with prior determination of the physical and mechanical properties of the supporting surfaces.

At the first stage, an experimental validation of the WES methodology was carried out on KrAZ-5233 and KamAZ-4310 vehicles. It was established that the speed of the KrAZ-5233 exceeds that of the KamAZ-4310 by 10–15% despite a higher load on the supporting surface, confirming the significant influence of powertrain, transmission, and tire parameters on mobility. The necessity of refining traditional mobility assessment criteria taking into account load distribution and running gear characteristics was demonstrated.

The second stage of the study was devoted to experimental validation of the modified mobility assessment methodology considering independent tire pressure control on the UAZ-469 vehicle. It was established that differentiated pressure selection for the front and rear axles allows accounting for soil property changes after the passage of the front wheels and ensures more complete utilization of the traction potential. An increase in maximum off-road speed by an average of 15–20% was experimentally confirmed, as well as improvements in VCI and MMP indicators, indicating reduced energy losses and improved tire–soil interaction efficiency. Based on the comparison of full-scale test results and simulation results, the adequacy of the developed mathematical model of all-wheel-drive vehicle motion on a deformable supporting surface was established, which is confirmed by the close agreement between experimental and calculated values of mobility indicators and maximum speed. Based on the research results, practical recommendations for improving the mobility of all-wheel-drive vehicles were formulated. It is shown that a rational pressure distribution involves reducing pressure on

the rear axle relative to the front when operating on weak soils, which ensures a reduction in specific ground pressure, stabilization of traction properties, and an increase in vehicle speed without loss of controllability.

In the **general conclusions**, the results of theoretical and experimental studies are summarized, the achievement of the research objective is confirmed, and directions for further research in the field of improving the mobility of wheeled vehicles are outlined.

Keywords: adaptive control, military vehicle, dynamics, wheeled vehicle, all-wheel drive, wheel propulsion unit, tyre, off-road mobility, supporting surface deformation, load-bearing capacity, soil compaction, motion resistance coefficient, traction coefficient, tractive effort, torque, vehicle speed, mathematical model, reduced tyre pressure, ground pressure, transmission, soil hardness, working layer, cone index.

LIST OF APPLICANT'S PUBLICATIONS

Publications presenting the main scientific results of the dissertation

1. Hrubel, M., Krainyk, L., Khoma, V. (2020). Simulation modeling of the movement of wheeled military vehicles in off-road conditions and assessment of its adequacy. *Avtoshliakhovyk Ukrainy*, No. 2, pp. 21–28. <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2020-2-262-21-28> (*The author developed a simulation model of off-road movement of military wheeled vehicles*).
2. Khudaverdian, H., Khoma, V., Krainyk, L. (2023). Simulation modeling of all-wheel-drive wheeled vehicles movement across a field using MATLAB Simulink environment. *Visnyk LNUP. Series: Agroengineering Research*, No. 26, pp. 164–170. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2022.26.164> (*The author developed a simulation model for all-wheel-drive vehicle movement across a field under transport and technological operating modes*).
3. Khoma, V. (2024). Efficiency of independent tire pressure control under off-road trafficability and mobility conditions. *Visnyk LNUP. Series: Agroengineering Research*, No. 27, pp. 22–26. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.022> (*The author improved a simulation model of off-road movement of all-wheel-drive vehicles considering centralized and independent tire pressure control and evaluated its efficiency*).
4. Manziak, M., Khoma, V., Hrubel, M., Krainyk, T. (2024). Improvement of ride smoothness evaluation methodology for high-mobility vehicles. *Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport*, No. 1(22), pp. 233–243. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1365> (*The author developed a two-dimensional mathematical model of a two-axle off-road vehicle considering suspension characteristics, tires, surface microprofile, and soil properties*).
5. Hrubel, M., Krainyk, L., Mikhalieva, M., Zalyпка, V., Manziak, M., Khoma, V., Lanets, O., Ruban, D., Andriienko, A., Kokhan, V. (2024). Improving a methodology for estimating the cross-country ability of all-wheel-drive vehicles. *Eastern-European*

Journal of Enterprise Technologies, No. 2(128), pp. 64–72. (Scopus) <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.302833> (The author proposed an improved Simulink-based model for off-road vehicle movement to determine maximum speed and other trafficability parameters based on empirical data).

6. Khoma, V. (2025). Experimental studies on the influence of independent tire pressure control on support trafficability indicators of vehicles. *Visnyk LNUP. Series: Agroengineering Research*, No. 29, pp. 64–69. <https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.64-69> (The author developed the experimental methodology and validation framework for assessing all-wheel-drive vehicle trafficability and verifying the simulation model).

Publications confirming approbation of dissertation results

7. Khoma, V. (2021). Vehicle mobility under off-road conditions. In: *Problems of Transport Flows and Ways of Their Solution: Proc. of the IV All-Ukrainian Conf.* (Lviv, March 25–26, 2021), pp. 111–112. (The author developed a mathematical model of sprung mass oscillations under off-road driving).

8. Khoma, V., Krainyk, L. (2021). Improving cross-country ability of wheeled vehicles by rational tire pressure control. In: *Prospects for Development of Weapons and Military Equipment: Proc. Int. Conf.* (Lviv, May 14, 2021), p. 67. (The author substantiated rational tire pressure ranges for improving vehicle trafficability).

9. Khoma, V. (2022). Independent tire pressure control in all-wheel-drive vehicles. In: *Problems and Prospects of Road Transport Development: Proc. X Int. Conf.* (Vinnytsia, April 14–15, 2022), pp. 304–306. (The author determined optimal pressure distribution across axles based on simulation results).

10. Khudaverdian, H., Khoma, V. (2022). Technological processes of soil cultivation: computer modeling. In: *Innovative Technologies in Mechanical Engineering and Transport Systems: Proc. III Int. Conf.* (Rivne, Oct 19–20, 2022). (The author developed a simulation model in MATLAB Simulink considering wheel–soil interaction and technological load).

11. Manziak, M., Khoma, V., Hrubel, M. (2023). Ride smoothness assessment of military wheeled vehicles under off-road conditions. In: *Problems and Prospects of Road Transport Development: Proc. XI Int. Conf. (Vinnytsia, April 13–14, 2023)*, pp. 221–224. *(The author analyzed suspension designs and relevant standards for ride comfort evaluation)*.

12. Khoma, V., Krainyk, L. (2023). Influence of tire pressure control on interaction with the supporting surface. In: *Current Problems of Modern Science: Proc. All-Ukrainian Conf. (Poltava, April 26–27, 2023)*, pp. 73–75. *(The author performed simulation of tire ID-370 movement on dry sand and analyzed tire–ground interaction)*.

Additional publications

13. Hrubel, M., Ftemov, Y., Khoma, V. (2019). Experimental studies of support trafficability parameters of wheeled military vehicles. *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 4(60), pp. 7–15. <https://doi.org/10.30748/soivt.2019.60.01> *(The author contributed to the development of an automated measurement system for vehicle motion parameters)*.

14. Hrubel, M., Manziak, M., Khoma, V., Lanets, O., Andriienko, A. (2023). Simulation modeling of mobility of wheeled military vehicles under off-road conditions. *Military Technical Collection of NASV*, No. 28, pp. 10–17. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023.10-17> *(The author digitized the Daimler test track and prepared input data for simulation modeling)*.

Patent

15. Kokhan, V., Krainyk, L., Hrubel, M., Manziak, M., Khoma, V. (2023). Certificate of copyright registration for the scientific work “Method for evaluating cross-country ability of wheeled military vehicles”, No. 116929 (March 9, 2023).

ЗМІСТ

ВСТУП.....	25
РОЗДІЛ I. ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ ПРОХІДНОСТІ АВТОМОБІЛІВ.	30
1.1 Історичні передумови формування поняття прохідності КТЗ.....	30
1.2 Аналіз методів оцінки прохідності військових КТЗ в країнах НАТО	41
1.3 Аналіз методів оцінки прохідності військових КТЗ в країнах колишнього СРСР.	54
1.4 Аналіз дослідження впливу тиску повітря в шинах на прохідність бездоріжжям.....	58
1.5 Узагальнення проблеми, мета і завдання дослідження	62
1.6 Висновки за розділом	64
РОЗДІЛ II. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ АВТОМОБІЛЯ БЕЗДОРІЖЖЯМ.....	66
2.1 Математичні моделі взаємодії шини з опорною поверхнею, що деформується.	66
2.2 Математична модель руху автомобіля бездоріжжям.....	74
2.3 Структура імітаційного моделювання руху у програмному середовищі MATLAB Simulink	78
2.4 Висновки за розділом	89
РОЗДІЛ III. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ І ОЦІНКА ВПЛИВУ РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ У ШИНАХ НА ПРОХІДНІСТЬ БЕЗДОРІЖЖЯМ	91
3.1 Оцінка впливу регулювання тиску повітря в шинах на рух автомобіля бездоріжжям.....	91
3.2 Регулювання тиску в шинах колісних схем 4x4, 6x6, 8x8 у взаємозв'язку з мобільністю автомобіля бездоріжжям.	99
3.3 Висновки за розділом	102

РОЗДІЛ IV. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА АДЕКВАТНОСТІ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І РЕКОМЕНДАЦІЙ	104
4.1 Методика і апаратура експериментального дослідження	104
4.2 Експериментальні дослідження та оцінка і аналіз результатів.....	106
4.3 Оцінка адекватності імітаційного моделювання руху бездоріжжям на базі експериментальних досліджень.....	112
4.4 Формування рекомендацій щодо роздільного регулювання тиску у шинах по осях.	115
4.5 Практичні рекомендації по конструктивному синтезу системи роздільного регулювання тиску в шинах.	116
4.6 Висновки за розділом	118
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	120
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	121
ДОДАТКИ.....	144
ДОДАТОК А	145
ДОДАТОК Б.....	146
ДОДАТОК В	148
ДОДАТОК Г.....	151
ДОДАТОК Ґ	153
ДОДАТОК Д.....	154
ДОДАТОК Е	155
ДОДАТОК Є	158
ДОДАТОК Ж.....	159

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ККД – коефіцієнт корисної дії

КТЗ – колісний транспортний засіб

КР – колісний рушій

ОП – опорна поверхня

CI – Cone Index (конусний індекс)

CTIS – Central Tire Inflation System (система централізованого регулювання тиску в шинах)

ITPCS – Independent Tire Pressure Control System (система роздільного регулювання тиску в шинах)

GNSS – Global Navigation Satellite System (глобальна навігаційна супутникова система)

MI – Mobility Index (індекс мобільності)

MN – Mobility Number (показник мобільності)

MMP – Main Maximum Pressure (середній максимальний тиск в плямі контакту)

NRMM I, NRMM II – NATO Reference Mobility Model (референта модель прохідності НАТО)

NWVPM — NATO Wheeled Vehicle Performance Model (модель оцінки ефективності колісних транспортних засобів)

NTVPM — NATO Tracked Vehicle Performance Model (модель оцінки ефективності гусеничних транспортних засобів)

VCI – Vehicle Cone Index (конусний індекс транспортного засобу)

VLCI - Vehicle Limiting Cone Index (граничний конусний індекс транспортного засобу)

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Прохідність у складних дорожніх умовах за відсутності твердого покриття є визначальною характеристикою КТЗ для військової сфери, екстрених служб, енергетики, будівництва, сільського та лісового господарств, оскільки забезпечує виконання транспортних та технологічних завдань. Наявний в Україні парк повноприводних автомобілів, що складається переважно із зразків радянського виробництва (ГАЗ, ЗиЛ, Урал, КамАЗ) є технічно застарілим, бо очевидно, що повноприводні розробки середини ХХ століття з точки зору прохідності суттєво відстають від сучасних зарубіжних аналогів у країнах ЄС. В умовах повномасштабної агресії Росії проти України питання оновлення парку автомобілів підвищеної прохідності стало дедалі гострішим і дана тенденція збережеться ще протягом багатьох років після закінчення війни, оскільки розмінування та відновлення дорожньої інфраструктури це тривалий і кропіткий процес. Виходячи з цього, перед вітчизняним автомобілебудуванням постає завдання відійти від науково-технічних напрацювань радянського періоду і запропонувати натомість перспективні рішення та методики, що дозволять скоротити наявне технічне відставання від країн НАТО.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана згідно з планом науково-дослідної тематики факультету механіки, енергетики та інформаційних технологій Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького « Розробка інноваційно-інформаційних, проєктно-керованих, ресурсощадних систем, технологій та технічних засобів для агро-промислового виробництва та його енергозабезпечення» (номер державної реєстрації УкрІНТЕІ 0121U109289), а також в рамках концепції 10 розвитку автомобілебудування в Україні, затвердженої розпорядженням КМУ №452-р від 3.08.2006 р. та тематики держбюджетних робіт ВАТ «Укравтобуспром» з розробки і оновлення національної нормативної бази та тематики робіт з Міністерством оборони України.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення прохідності повноприводних автомобілів на бездоріжжі. Створення методики кількісної оцінки взаємозв'язку показників мобільності (насамперед максимально можливої швидкості руху) з характеристиками автомобіля, тиском в шинах, фізико-механічними властивостями ОП а також формування практичних рекомендацій по конструктивному синтезу системи роздільного регулювання тиску в шинах автомобілів багатоцільового та військового призначення.

Для досягнення мети поставлені наступні завдання:

- огляд і аналіз існуючих нормативних баз та наукових досліджень у сфері прохідності автомобілів;
- розробка математичної моделі і дослідження мобільності повноприводних автомобілів на бездоріжжі у взаємозв'язку з тиском повітря в шинах;
- проведення експериментальних досліджень, аналіз отриманих результатів і оцінка адекватності розробленої комп'ютерної моделі;
- формування рекомендацій щодо роздільного регулювання тиску в шинах.

Об'єкт дослідження – процес руху бездоріжжям повноприводних колісних транспортних засобів багатоцільового призначення, оснащених системами централізованого та роздільного регулювання тиску в шинах.

Предмет дослідження – вплив систем регулювання тиску в шинах на показники опорно-зчіпної прохідності повноприводних автомобілів на бездоріжжі.

Методи дослідження. В дисертаційній роботі застосовувались методи імітаційного моделювання, методи оцінки адекватності й точності експериментальних досліджень, методи проведення експериментальних досліджень і опрацювання результатів.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження.

Уперше:

- розглянуто ефективність впровадження системи роздільного регулювання тиску повітря в шинах з умов підвищення прохідності на покриттях, що деформуються;

- визначено раціональні діапазони регулювання тиску в шинах повноприводних автомобілів багатоцільового призначення при русі бездоріжжям.

Набуло подальшого розвитку:

- методи визначення прохідності повноприводних автомобілів оснащених системами централізованого та роздільного регулювання тиску в шинах.

Практичне значення результатів дослідження. Проведені на зразках військової автомобільної техніки дослідження дозволили: сформулювати проект національного стандарту – ДСТУ В «Військова техніка. Прохідність. Вимоги та оцінка відповідності; опрацювати методику оптимізаційного розрахунку необхідних характеристик і конструктивних параметрів повноприводних автомобілів з умов підвищення прохідності. Опрацьовані в даній роботі методики і результати прийняті та використовуються в ВАТ «Укравтобуспром» та ТОВ «Завод Електронмаш» в дослідно-конструкторських роботах.

Особистий внесок здобувача. Автором на основі аналізу доступних із різних джерел досліджень у цій сфері розроблено імітаційну комп'ютерну модель руху повноприводних автомобілів бездоріжжям та запропоновано концепцію роздільного регулювання тиску повітря у шинах з метою покращення прохідності.

Основні результати, рекомендації та висновки, що наведені у дисертаційній роботі, отримані автором самостійно були опубліковані у фахових виданнях, зареєстрованих МОН України. Серед них аналізи існуючих наукових публікацій та нормативних баз, опрацювання математичної моделі і її реалізації в програмному середовищі MATLAB Simulink, виконання теоретичних досліджень, проведення експерименту, аналіз та оцінка отриманих результатів.

В опублікованих у співавторстві наукових працях дисертанту належать: обґрунтування вибору середовища імітаційного моделювання руху повноприводного автомобіля бездоріжжям; реалізація моделювання роботи системи роздільного регулювання тиску в середовищі MATLAB Simulink; розробка алгоритму експериментальних досліджень прохідності автомобілів; розробка комплексу вимірювальної апаратури; опрацювання результатів імітаційного моделювання та натурних випробувань.

Апробація результатів роботи. Основні результати роботи доповідались на міжнародних і всеукраїнських конференціях та форумах:

IV Всеукраїнській конференції «Проблеми з транспортними потоками і напрямки їх розв'язання» (Львів, 25-26 березня 2021 р.);

Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи розвитку озброєння та військової техніки» (Львів, 14 травня 2021 р.);

X Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту» (м. Вінниця 14-15 квітня 2022 р.);

III Міжнародній науково-технічній інтернет-конференції «Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем» (м. Рівне 19-20 жовтня 2022р.);

XI Міжнародній науково-технічній інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (м. Вінниця 14 квітня 2023 р.);

I Всеукраїнській науково-практичній конференції «Актуальні проблеми сучасної науки: теоретичні та практичні дослідження молодих учених» (м. Полтава 26-27 квітня 2023 р.);

XXV Міжнародному науково-практичного форумі (м. Дубляни 02–04 жовтня 2024 р.);

IV Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури» (м.Київ 0-12 грудня 2024 р.).

Публікації. Основні результати опубліковано у 15 наукових працях, у тому числі 5 статті у фахових виданнях МОН України, 1 стаття у виданні проіндексованому у базі даних Scopus, 2 статті в інших фахових виданнях, 6 тез доповідей на всеукраїнських і міжнародних конференціях, 1 авторському праві на науково-практичний твір.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, який налічує 255 найменування. Обсяг роботи становить 162 сторінки основного тексту, 7 таблиць, 44 рисунки, 9 додатків.

РОЗДІЛ I. ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ ПРОХІДНОСТІ АВТОМОБІЛІВ

1.1 Історичні передумови формування поняття прохідності КТЗ

Прохідність — це експлуатаційна властивість, що характеризує здатність автомобіля пересуватися поза дорогами загального користування, в умовах погіршеної дорожньої інфраструктури, долати як природні, так і штучні перешкоди без використання допоміжних засобів. До перешкод можна віднести підйоми, спуски, канави, горби, каміння, колоди, болота. Термін «прохідність автомобіля» почав активно використовуватися у першій половині ХХ століття в контексті розвитку військової техніки. Перші спроби науково окреслити прохідність пов'язані з розвитком військової техніки і танків, так у 1920-1930-ті роки в СРСР та США почали з'являтися перші праці, присвячені впливу конструкції автомобілів на здатність пересуватися бездоріжжям. Під час і після Другої світової війни, цей термін закріпився у військовій техніці. У 1960-1970-ті роки на базі військових розробок почали створюватися цивільні позашляховики, що дало поштовх дослідженням у цій сфері. Оскільки більшість перешкод носять геометричний характер, то до середини минулого століття сформувалася стійка думка, що прохідність повною мірою залежить від конструктивних параметрів автомобіля, а саме кліренсу, колісної формули та кутів звису, наявності повного приводу. З іншого боку бездоріжжя характеризується поганим станом ОП з кардинально іншими фізико-механічними властивостями на відміну від доріг загального користування. Тому з часом поняття «прохідність» диференціювали на профільну та опорно-зчіпну і дослідження останньої лягли в основу наукової дисципліни «террамеханіка».

Террамеханіка — це наукова дисципліна, яка вивчає взаємодію колісних та гусеничних транспортних засобів із ґрунтовими або іншими ОП. Цей напрямок охоплює процеси деформування ґрунту під дією рушіїв транспортних засобів, дії сил зчеплення та опору коченню, закономірності буксування, вплив параметрів ґрунту (щільності, вологості, структури) на рух транспортних засобів. Термін був

введений в 1960-1970-х роках та широко розвинений у працях M.G. Bekker, основоположників сучасної террамеханіки. У своїй книзі «Theory of Land Locomotion» [23] він вперше систематизував поняття прохідності та запропонував математичні моделі взаємодії шин з ґрунтом. В його роботах [23-25] висвітлено основи взаємодії між ґрунтом і транспортними засобами, а також розглянуто основні підходи до оцінки прохідності ґрунту. Автор аналізує фізичні властивості ґрунту та параметри транспортних засобів, що впливають на здатність до пересування по різних типах ґрунту. Починаючи з кінця п'ятдесятих Bekker ввів поняття “soil trafficability”, що дослівно означає здатність ОП забезпечувати рух транспортних засобів.

Після M. G. Bekker розвиток теорії прохідності та террамеханіки продовжили чимало дослідників, як у західних країнах, так і в СРСР та інших частинах світу. Вони розширювали закладені ним концепції, застосовували їх у нових сферах, таких як розробка повноприводної техніки, військових машин і навіть планетоходів. J. V. Wong у своїх роботах [189-202], а особливо в книзі «Theory of Ground Vehicles» [194], яка стала класичним підручником у галузі террамеханіки, розробив теорію взаємодії коліс і гусениць з ґрунтом, зокрема в аспектах впливу структури шин та геометрії поверхні. A. Reese [139] розвинув підходи до взаємодії шин із ґрунтом, запропонував методи оцінки прохідності, що враховують пружні властивості ґрунту та деформацію шин. S. Shoor [160-162], який працював в сфері військової техніки США, розширив підходи террамеханіки за допомогою комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень. J. Freitag [60-64] вивчав вплив тиску в шинах на прохідність в умовах війни, працював над застосуванням террамеханіки на етапах створення зразків армійських транспортних засобів. В.В. Пясецький, один з провідних радянських фахівців у сфері террамеханіки, запропонував методи оцінки прохідності для військової та сільськогосподарської техніки, вивчав взаємодію шин з м'якими і нестабільними ґрунтами. Н.Ф. Кошарний [232-235] працював над моделями деформації шин і впливу ґрунту пляму контакту, вивчав залежність прохідності від геометрії та малюнку протектора.

Серед робіт вітчизняних науковців, що вивчають прохідність та енергоефективність КТЗ варто відзначити праці Подригала М.А [240-242], Реброва О.Ю [243-247] та Кюрчева В.М. [119, 216, 223, 236, 239] та Антощенкова Р.В. [217-219]

У роботі Подригала М.А [240] розглянуто проблему підвищення точності оцінки енергоефективності автомобіля шляхом визначення коефіцієнта корисної дії (ККД) колісного рушія. Для досягнення цієї мети автори оптимізували існуючу модель ККД ведучого колеса, отримали аналітичний вираз коефіцієнта втрат для веденого колеса та сформували узагальнену модель ККД колісного рушія автомобіля. Використовувався підхід теорії пружності, який дозволяє врахувати кутову та радіальну жорсткість шини, а також виконано аналіз силового й енергетичного балансу колеса. У результаті дослідження встановлено, що зі збільшенням крутного моменту, підведеного до ведучого колеса, ККД зростає і досягає максимального значення при реалізації граничної сили зчеплення з дорогою; для реальних умов експлуатації значення ККД становить близько 0,93–0,97 для легкових та 0,90–0,93 для вантажних автомобілів. Показано, що погіршення дорожніх умов (грунт, пісок) призводить до суттєвого зниження ККД, а застосування здвоєних коліс або збільшення кількості ведучих мостів сприяє його зростанню за рахунок зменшення кутової деформації шин. Отримана модель веденого колеса дозволила визначити коефіцієнт втрат потужності, який враховує опір кочення та деформаційні втрати, і підтвердила, що ведені колеса мають нижчу енергетичну ефективність порівняно з ведучими. Узагальнена модель ККД колісного рушія показала, що підвищення частки ведучих коліс у конструкції автомобіля забезпечує зростання загальної енергоефективності. Отримані результати можуть бути використані при раціональному проектуванні шасі транспортних засобів за критеріями енергоефективності.

У статті Подригала М.А. та Нікорчука А.І. [241] розглянуто проблему підвищення прохідності автомобілів і наземних роботизованих комплексів в умовах бездоріжжя, що безпосередньо впливає на мобільність і ефективність виконання бойових завдань. Метою роботи було поліпшення експлуатаційних

властивостей техніки шляхом уточнення структури прохідності та удосконалення методів її оцінки. Автори обґрунтовують, що прохідність є комплексною властивістю, яка включає профільну та опорно-зчипну прохідність, а також маневреність і плавність ходу, які визначають швидкість руху та здатність долати перешкоди. Запропоновано використовувати середню швидкість подолання складної ділянки як узагальнений критерій оцінки прохідності, що враховує вплив дорожніх умов, нерівностей, опору кочення та зчеплення. Додатково запропоновано застосування імовірнісних показників (ймовірність досягнення пункту за заданий час, математичне очікування швидкості) для оцінки мобільності техніки. У результаті дослідження сформовано структурну модель прохідності, яка системно поєднує її складові та дозволяє оцінювати їх вплив на рух у складних умовах. Підвищення маневреності, рівномірності навантаження на колеса та адаптації рушія до умов руху дозволяє скоротити час подолання ділянки та підвищити ефективність техніки.

У статті Подригала М.А., Краснокутського В.М., Кашканова В.А., Ткаченка О.С. та Янчика О.Г. [242] розглянуто вплив аеродинамічних характеристик на енергоефективність і тягово-швидкісні властивості автомобіля та запропоновано вдосконалений метод вибору параметрів моторно-трансмісійної установки на стадії проектування. Метою роботи було покращення динамічних властивостей автомобіля шляхом уточнення розрахунку аеродинамічного опору руху, зокрема через врахування залежності коефіцієнта лобового опору від швидкості, що в традиційних методиках приймається сталим і призводить до значних похибок. Для досягнення мети авторами уточнено методика визначення максимальної ефективної потужності двигуна, максимальної конструктивної швидкості автомобіля та вибору передавальних чисел трансмісії. У роботі запропоновано емпіричну залежність коефіцієнта аеродинамічного опору від швидкості, що дозволило отримати більш адекватну оцінку сили опору повітря; показано, що традиційний підхід може завищувати її значення в декілька разів на високих швидкостях. У результаті встановлено, що обмеження максимальної швидкості автомобіля часто визначається не аеродинамічним опором, а параметрами двигуна

та передавальними числами трансмісії. Запропоновано два шляхи підвищення динамічних властивостей: зменшення передавального відношення на вищій передачі або зниження необхідної потужності двигуна при збереженні трансмісії. Розроблено узагальнену методику вибору параметрів силової установки, яка дозволяє більш точно визначати енергетичні витрати та забезпечує підвищення ефективності проектування автомобілів.

У роботах Реброва О.Ю. [243-247] розглянуто сучасні підходи до визначення раціональних типорозмірів шин, проаналізовано взаємодії ходових систем транспортних засобів подвійного призначення із ґрунтом. Метою було підвищення їх технічного рівня та зменшення питомого тиску на ґрунт. Автором обґрунтовано значення проблеми в контексті сучасних умов експлуатації техніки в Україні, де зростає потреба у застосуванні універсальних транспортних засобів, здатних працювати як у цивільному, так і у військовому секторі. Підкреслено, що ключовим фактором ефективності таких машин є вибір шин, який визначає рівень тягових властивостей, витрати пального, ступінь ущільнення ґрунту та прохідність.

Окремо проаналізовано методи зменшення ущільнення ґрунту, серед яких зниження внутрішнього тиску в шинах, використання здвоєних коліс, удосконалення конструкції каркаса та заповнення шин рідиною. Розглянуто сучасні технології шинної промисловості, зокрема IF (Increased Flexion) та VF (Very High Flexion), які забезпечують підвищену деформаційну здатність боковини шини та дозволяють працювати при зниженому тиску без втрати несучої здатності. Показано, що збільшення площі контакту дозволяє знизити питомий тиск, однак може впливати на енергетичні витрати та керованість. Обґрунтовано доцільність використання шин зі змінним тиском у діапазоні 0,6–1,8 бар для адаптації до різних умов руху.

За результатами аналізу експериментальних даних встановлено, що зниження тиску в шинах на 20–25% дозволяє зменшити ущільнення ґрунту до 35%, а застосування VF-шин підвищує зчеплення на 12–15%. Використання систем регулювання тиску забезпечує зниження витрат пального на 4–6%.

Наголошується, що впровадження шин із пониженим та регульованим тиском є ключовим напрямом підвищення ефективності транспортних засобів подвійного призначення, що дозволяє зменшити деградацію ґрунтів, підвищити енергоефективність і розширити функціональні можливості техніки. Перспективним напрямом визначено розвиток автоматизованих систем адаптивного керування тиском у реальному часі з урахуванням параметрів ґрунтового середовища та навантаження.

В роботі [245] Ребровим О.Ю представлено комплексну методіку визначення раціональних типорозмірів шин для комплектування колісних сільськогосподарських тракторів. Підкреслено, що вибір шин є ключовим фактором, який визначає продуктивність трактора, витрати пального та ступінь впливу на ґрунтове середовище. Зазначено, що надмірне ущільнення ґрунту призводить до деградації його структури та зниження родючості, що регламентується національним стандартом. У зв'язку з цим обґрунтовано потребу у методичних підходах до оптимального підбору шин. Запропоновано математичну модель взаємодії колеса з ґрунтом, що включає визначення радіальних навантажень, тиску в шині, буксування, сили тяги, опору коченню та продуктивності технологічних операцій. Використано залежності, що дозволяють враховувати характеристики двигуна, трансмісії, деформацію ґрунту та параметри плями контакту шини. Результати показали, що використання різних типорозмірів шин суттєво впливає на інтегральний показник ефективності. Найвищі значення отримано для сучасних шин VF-класу, зокрема Michelin Xeobib та Mitas HC2000. Встановлено, що застосування здвоєних і зтроєних шин у поєднанні з баластуванням дозволяє підвищити узагальнений показник ефективності на 20–30% і більше.

Ребров виконав аналіз взаємодії ходових систем із ґрунтом на основі вибірки машин провідних світових виробників [244]. Для визначення показників максимального тиску на ґрунт використовувалася контурна площа плями контакту шин за умов тривалої роботи при високих крутних моментах.

Встановлено, що ключовими факторами, які визначають рівень впливу на ґрунт, є конструктивне положення центру мас та різниця індексів довжини окружності кочення шин, яка дозволяє розділити трактори на дві характерні групи: загального та універсально-просапного призначення і спеціального (утилітарного) призначення. Для першої групи типовими є коефіцієнти розподілу ваги 0,40–0,44, для другої — 0,44–0,46, з окремими відхиленнями до 0,48. Показано, що реальний розподіл навантаження між осями суттєво впливає на величину максимального тиску шин на ґрунт у широкому діапазоні тягових режимів.

Виконано аналіз можливості зниження максимального тиску на ґрунт шляхом забезпечення рівності навантаження на передні та задні шини з урахуванням їх контурної площі контакту. Встановлено, що існує оптимальне положення центру ваги, яке забезпечує мінімальне значення максимального тиску при заданій масі трактора. Показано, що при динамічному регулюванні розподілу ваги в процесі тягових операцій можливе наближення до цього оптимуму, що дозволяє знизити максимальний тиск на ґрунт у середньому на 8...40 кПа залежно від режиму роботи.

Отримані результати свідчать, що впровадження систем керування розподілом ваги між мостами дає змогу суттєво покращити агроекологічні показники сучасних колісних тракторів без зміни базової конструкції шин. Узагальнено встановлено, що це забезпечує підвищення частки території, придатної для експлуатації тракторів без порушення агроекологічних вимог, приблизно на 14%, що є суттєвим резервом підвищення екологічної ефективності існуючих транспортно-тягових систем.

Теоретичні дослідження, виконані Кюрчевим В.М. [223] на основі моделей тягової динаміки колісного рушія, дозволяють встановити аналітичні залежності між буксуванням, силою тяги та параметрами взаємодії шини з ґрунтом. Встановлено, що основним обмежувальним фактором є досягнення граничного стану ґрунту за зсувом. Результати чисельного моделювання показали, що максимально допустиме буксування істотно залежить від типу агрофону: зі збільшенням коефіцієнта опору коченню допустиме значення буксування

зменшується. Також встановлено, що збільшення вертикального навантаження на рушій дозволяє підвищити допустиме буксування за рахунок зростання сил зчеплення між шиною і ґрунтом. Важливим фактором є також геометрія ґрунтозачепів, зокрема кут їх розташування, який впливає на характер передачі зусилля в ґрунтовому середовищі.

Порівняльний аналіз тракторів різних тягових класів показав, що машини з більшою масою та навантаженням на рушії можуть працювати при вищих значеннях допустимого буксування без перевищення граничних навантажень на ґрунт. Таким чином, визначення максимально допустимого буксування колісних рушіїв повинно базуватися на комплексному врахуванні фізико-механічних властивостей ґрунту, конструктивних параметрів рушія та умов експлуатації.

Для підвищення тягово-зчіпних характеристик в роботі [119] запропоновано комплексний підхід, що включає оптимізацію розподілу ваги трактора по осях, регулювання тиску в шинах, застосування спеціальних технічних засобів підвищення зчеплення. Зокрема, зміна тиску в шинах дозволяє керувати площею контакту шини з ґрунтом, що безпосередньо впливає на реалізацію тягового зусилля. Підвищення тиску зменшує деформацію шини та може збільшити ефективність передачі тяги, однак водночас підвищує питомий тиск на ґрунт і сприяє його ущільненню. Зниження тиску, навпаки, зменшує негативний вплив на ґрунт, але може призводити до погіршення тягових властивостей.

Оптимальний розподіл ваги між осями трактора [236] є ще одним важливим фактором, що визначає ефективність реалізації зчіпної ваги. Рівномірний або близький до оптимального розподіл дозволяє забезпечити стабільність руху, зменшити втрати на буксування та покращити використання маси трактора для формування тягового зусилля. Натомість неправильний розподіл ваги призводить до перевантаження однієї з осей, погіршення зчеплення та зростання енергетичних витрат. Найбільш результативним стало поєднання регулювання тиску в шинах, оптимального розподілу маси та використання додаткових технічних засобів підвищення зчеплення. При цьому вибір конкретного методу повинен

здійснюватися з урахуванням ґрунтових умов, типу виконуваних операцій та вимог до агротехнічних показників.

Метою дослідження [216] було встановлення умов доцільності використання подвоєних або потроєних колісних рушіїв замість одинарних з позиції зменшення ущільнення ґрунту та підвищення агротехнічної ефективності. Теоретичні та експериментальні дослідження базуються на положеннях теорії тягового опору та взаємодії еластичного колеса з деформованим ґрунтом, а також на експериментальних даних, отриманих при роботі трактора класу 3. Встановлено, що передній рушій є критичним з точки зору первинного впливу на недеформований ґрунт, тому саме він визначає характер початкової деформації.

Отримано залежності, які пов'язують глибину колії, щільність ґрунту та втрати врожайності з конструктивними параметрами рушія, зокрема його шириною та кількістю коліс. Встановлено, що зі збільшенням ширини та кратності шин зменшується глибина колії, що при подвоєнні становить приблизно 20%, а при потроєнні — до 30% порівняно з одинарним рушієм. Відповідно, щільність ґрунту в зоні проходу знижується до 26–42%, що прямо корелює зі зменшенням негативного впливу на структуру орного шару. Одночасно спостерігається зростання урожайності культур у зоні проходу: при подвоєних шинах — майже у 2 рази, при потроєних — додатково до 8–10% відносно попереднього рівня.

Встановлено, що ефективність застосування багатошинних рушіїв визначається співвідношенням параметрів ґрунту (щільність, твердість, вологість) та конструктивних характеристик рушія. Найбільш інтенсивний ефект зменшення ущільнення спостерігається при переході від одинарного до подвоєного рушія, тоді як подальше збільшення кількості шин дає менш виражений, але стабільний позитивний ефект. Додатково розглянуто альтернативу у вигляді абочних шин низького тиску як компромісне рішення.

Загалом доведено, що застосування подвоєних і потроєних колісних рушіїв є доцільним з точки зору зменшення деградації ґрунтової структури та підвищення продуктивності сільськогосподарських культур, особливо в умовах інтенсивного механізованого обробітку. Результати можуть бути використані для оптимізації

конструкцій ходових систем енергетичних засобів та обґрунтування агротехнічних вимог до їх експлуатації.

В роботі [239] визначалися закономірності впливу енергонасиченості колісного трактора на величину сили його опору коченню та визначення характеру взаємозв'язку між енергетичними, кінематичними й тяговими параметрами машинно-тракторного агрегату. Для досягнення поставленої мети виконано комплекс теоретичних досліджень, що базуються на положеннях класичної теорії трактора та теорії тягового балансу, а також проведено аналіз експериментальних даних, отриманих при роботі машинно-тракторних агрегатів у типових польових умовах. Розглянуто усталені режими руху агрегату в діапазоні швидкостей, характерних для сільськогосподарських операцій, із врахуванням особливостей взаємодії колісного рушія з ґрунтовим середовищем.

Показано, що сила опору коченню не має прямої однозначної залежності від параметра енергонасиченості, а її зміна визначається суперпозицією двох протилежних ефектів: з одного боку, збільшення енергонасиченості сприяє підвищенню тягових можливостей і потенційно може збільшувати навантаження в системі «рушій – ґрунт»; з іншого боку, супроводжується зростанням швидкості руху, що змінює умови формування опору коченню та може знижувати його величину. Окремо встановлено, що функціональний коефіцієнт, який пов'язує швидкість руху з тяговим опором, сам залежить від умов навантаження агрегату, що додатково ускладнює формалізацію загальної моделі процесу.

Аналіз показав, що спрощені підходи, які розглядають опір коченню як незалежну або лінійну функцію енергонасиченості, не враховують багатофакторного характеру процесів у системі «трактор – ґрунт – знаряддя» і можуть призводити до методологічних похибок при проектуванні енергетичних засобів. Зроблено висновок, що однозначне визначення впливу енергонасиченості трактора на величину опору коченню потребує подальших фундаментальних досліджень із залученням уточнених моделей взаємодії рушія з ґрунтом, а також врахуванням реальних режимів роботи машинно-тракторних агрегатів у змінних польових умовах.

У роботі Антощенкова Р.В. та ін. [217] досліджено динаміку повнопривідної тягово-транспортної машини з метою підвищення її тягово-енергетичних показників шляхом аналізу роботи трансмісії та визначення взаємозв'язків між кутовими швидкостями, крутними моментами та силами тяги на колесах.

Встановлено, що під час роботи трансмісії виникає кінематична невідповідність між передніми та задніми колесами, оскільки кутові швидкості передніх коліс (1,29 та 1,27 рад/с) перевищують відповідні значення задніх коліс (1,24 та 1,25 рад/с), що призводить до додаткових енергетичних втрат у трансмісії. Під час розгону спостерігається зростання крутного моменту двигуна до 1100 Н·м, а також значні коливання моменту зчеплення, після чого система виходить на стабільний режим роботи. Визначено, що крутні моменти на передніх ведучих колесах досягають 6972 Н·м, а на задніх — 4622 Н·м у сталому режимі, при цьому в перехідному процесі спостерігається їх істотне короткочасне зростання. Встановлено також, що дотичні сили тяги на передніх колесах становлять 5478 Н, а на задніх — 3473 Н після завершення розгону, тоді як у перехідному режимі вони значно перевищують ці значення. Показано, що зміна кутових швидкостей та нерівномірність навантаження між осями є основним фактором втрат енергії в трансмісії. Отримані результати підтверджують адекватність розробленого методу

У роботі [218] Антощенковим досліджено вплив міжколісного диференціала на динамічні та тягово-енергетичні показники повнопривідного чотириколісного трактора з метою підвищення ефективності його роботи. Запропоновано метод визначення динаміки колеса мобільної машини за допомогою інерціального датчика (акселерометр, гіроскоп, магнітометр), встановленого в центрі колеса без втручання в конструкцію [219]. На основі кутової швидкості та GPS визначається швидкість руху і миттєве буксування коліс у динаміці.

Встановлено, що блокування диференціала підвищує тягові показники [218]. Блокування диференціала покращує тягу та зменшує буксування, однак супроводжується виникненням паразитних потужностей, підвищеним зношуванням шин і додатковими динамічними навантаженнями.

1.2 Аналіз методів оцінки прохідності військових КТЗ в країнах НАТО

Загалом щодо прохідності КТЗ бездоріжжям слід констатувати існування практично двох різних наукових шкіл – «Східної», яку використовує РФ та більшість країн, які входили до складу колишнього СРСР, і «Західної», яку використовують США та країни НАТО. В «Західній» науковій школі паралельно існує декілька методів оцінки опорно-зчіпної прохідності, усі вони є напівемпіричними і переважно базуються на конусному індексі ОП (CI, Cone Index) як показнику несучої здатності ґрунту.

У США та деяких країнах НАТО мобільність наземних транспортних засобів оцінюється за допомогою моделі еталонної прохідності (NRMM. NATO Reference Mobility Model) з моменту її запровадження у 1979 році [199]. У моделі NRMM та її доопрацьованій версії NRMM II для прогнозування прохідності військових колісних і гусеничних машин на дрібнозернистих та болотистих ґрунтах як критерій оцінки використовується конусний індекс транспортного засобу (VCI, Vehicle Cone Index)

VCI був запропонований під час Другої Світової Війни експериментальною станцією водних шляхів (Waterway Experiment Station, WES), що входить до складу інженерного корпусу армії США. VCI відображає мінімальну несучу здатність ґрунту, яку повинен мати його робочий шар, щоб транспортний засіб успішно здійснив певну кількість проїздів, зазвичай від одного до п'ятдесяти. VCI визначається на основі емпіричних залежностей, отриманих із результатів польових випробувань, і тому є емпіричним критерієм оцінки прохідності, чим більше його значення, тим менш мобільною стає КТЗ.

Спочатку мінімально необхідна несуча здатність ОП визначалася експериментально, шляхом багаторазового проїзду по одній колії з відомим CI, до моменту іммобілізації вибраного транспортного засобу. На основі випробувань на різних типах поверхонь будувалися графіки залежності кількості проходжень від CI, а методами екстраполяції визначалася несуча здатність ґрунту, достатня для одноразового проходження. Побудовані графіки дали можливість безпосередньо

визначити несучу здатність, необхідну для проходу колони з відомою кількістю транспортних засобів. З метою верифікації результатів дослідження додатково фіксувалися фактичні напруження (тиск) у ґрунті, що виникали під час проходу техніки, що стало основою для подальших аналітичних розрахунків.

Подальший розвиток методу полягав у розробці виразів для визначення можливості руху транспортних засобів у складних умовах місцевості, критерієм якої було обрано тягове зусилля - тобто надлишкове зчеплення, яке перевищує миттєве тертя і необхідне для подолання опору повороту, опору буксирування причепів, опору прискорення, підйому тощо. З метою узагальнення результатів виміряні тягові зусилля були приведені до ваги транспортного засобу, що дало змогу визначити коефіцієнт зчеплення. Оскільки надлишкове зчеплення можливе лише на поверхнях із несучою здатністю, що перевищує VCI, отримані характеристики будувалися як функція надлишкової несучої здатності ґрунту RCI-VCI (рисунок 1.1).

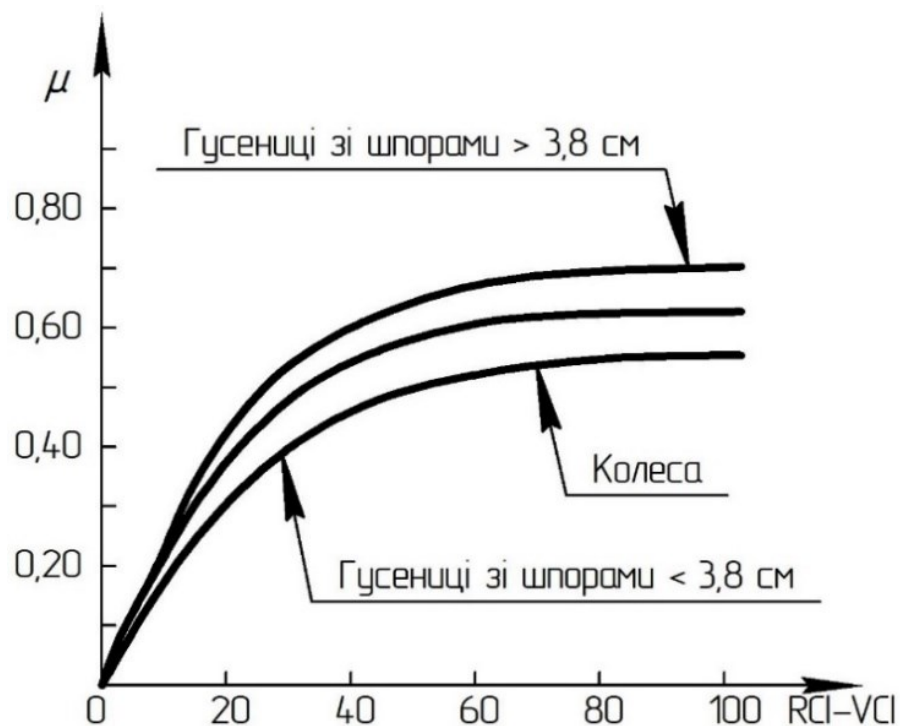


Рисунок 1.1 - Залежність коефіцієнта зчеплення від надлишкової несучої здатності ґрунту [104]

Результатом польових досліджень стала розробка розрахункового методу оцінки VCI [7] для проходження одного або декількох колісних транспортних засобів по дрібнозернистому ґрунті:

$$VCI_1 = 11,48 + 0,2MI - \left(\frac{39,2}{MI + 3,74} \right) \quad (1.1)$$

$$VCI_{50} = 28,23 + 0,43MI - \left(\frac{92,67}{MI + 3,67} \right) \quad (1.2)$$

Згодом в 1992 році у роботі [7] було запропоновано вираз для визначення VCI на болотистих ґрунтах:

$$VCI_{1(MK)} = 13 + 0,535 \left(\frac{W}{(b + d)n} \right) \quad (1.3)$$

де W - вага, фунти; b - ширина профілю шини, дюйми; d - вільний діаметр шини при номінальному тиску, дюйми, n - кількість коліс.

Основою аналітичного методу є індекс мобільності транспортного засобу (MI, Mobility Index) який враховує усі конструктивні параметри транспортного засобу і має вигляд:

$$MI = \left(\frac{P_{FG} \cdot W}{T \cdot G} + L - H \right) E \cdot X \quad (1.4)$$

де: P_{FG} – фактор тиску в плямі контакту; W – фактор ваги, T – фактор рушія; G – фактор ґрунтозачепів; L – фактор розподілу навантаження; H – фактор кліренсу; E – фактор двигуна; X – фактор трансмісії.

На рисунку 1.2 показано прохідність транспортних засобів на піщаних і глинистих ґрунтах із низькою та високою вологістю. На ньому наведено середні діапазони значень VCI, розраховані для колісних транспортних засобів. З рисунку 1.2 видно, що у разі зменшення необхідної кількості проходів для колісних транспортних засобів приблизно на 30% імовірність подолання відповідної ділянки місцевості колісною машиною стає кращою, за винятком ґрунтів із дуже низькою несучою здатністю. Якщо необхідну кількість проходів визначено заздалегідь, стає можливим оцінити додаткову корисну масу, яку може перевозити колісний транспортний засіб. Такий додатковий запас вантажопідйомності може бути реалізований у вигляді підвищення вогневої потужності або рівня захисту.

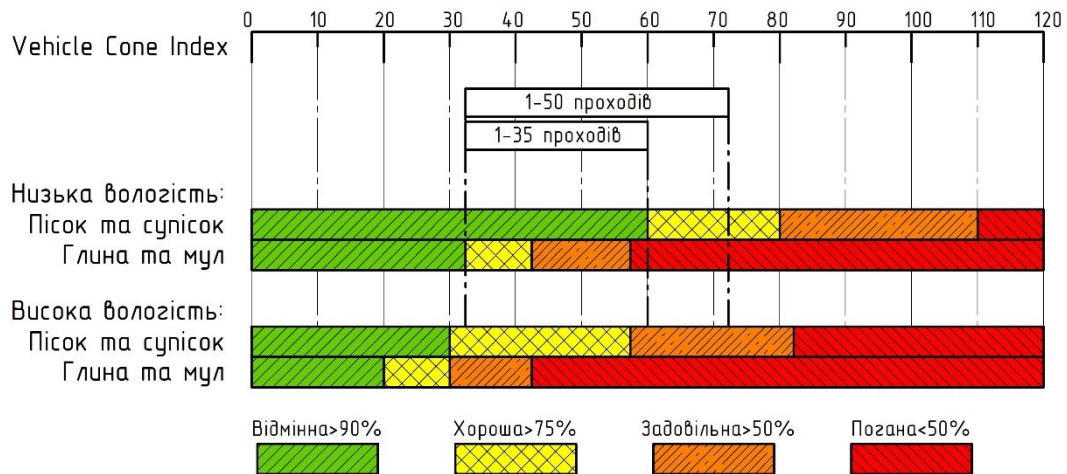


Рисунок 1.2 - Класифікація прохідності транспортного засобу за методикою VCI

Недоліком методу VCI є три емпіричні етапи в процедурі оцінки, що різко контрастують із фізичними моделями, такими як NTVPM для гусеничних транспортних засобів і NWVPM для колісних транспортних засобів [190-191], які використовують конструктивні параметри транспортного засобу та особливості рельєфу як вхідні дані для прямого прогнозування показників продуктивності транспортних засобів, таких як коефіцієнт тяги, коефіцієнт опору руху тощо. Також метод VCI неможливо використовувати у випадку руху по крупнозернистих, засніжених та мерзлих ґрунтах.

Впровадження радіальних шин з широким профілем і не найкраща кореляція між значеннями тягового зусилля визначеними експериментально та за методом VCI (особливо на ґрунтах з високою несучою здатністю) спонукали WES до розробки аналітичного методу, що дозволяє точніше оцінити тягові зусилля колісних транспортних засобів на ділянках із відомим CI. Основою стали польові випробування транспортних засобів на різних ОП (домінували ґрунти, що забезпечували тягове зусилля на рівні 50% від ваги транспортного засобу) та стендові випробування пневматичних шин при буксуванні в 20% на різних типах ґрунтів [104]. Результатом стало впровадження нових критеріїв: коефіцієнту тягового зусилля та коефіцієнту ефективності передачі зусилля на ґрунт (для буксування $s = 20\%$) (рисунок 1.3), які не є функцією надлишкової несучої здатності ґрунту, а залежать від показника мобільності MN (Mobility Number).

Розробка показника мобільності MN з урахуванням стандартизованих розмірів шин і навантажень на колесо дозволила досягти кращої кореляції між розрахунковими та вимірними значеннями тягового зусилля для досліджуваної групи транспортних засобів.

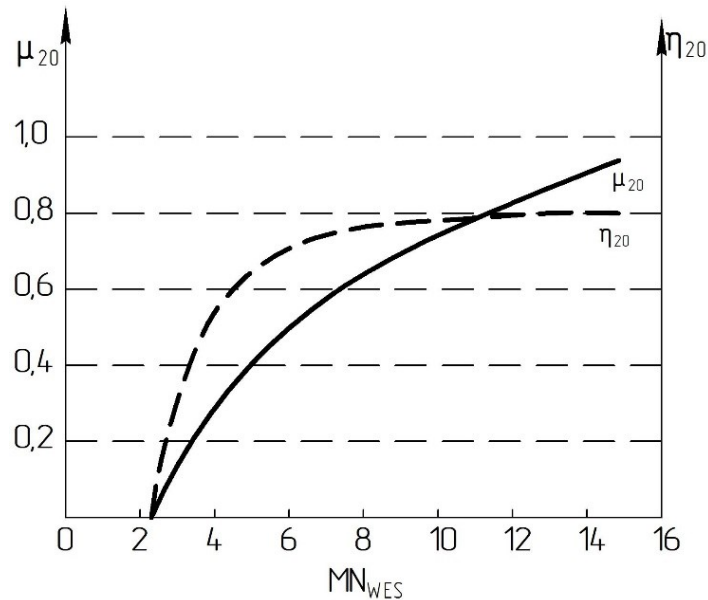


Рисунок 1.3 - Залежність коефіцієнта зчеплення від коефіцієнту мобільності MN_{WES} [194]

Було виявлено суттєвий вплив параметрів ґрунту та гранулометричного складу на тягові характеристики транспортних засобів, що зумовлює необхідність уточнення різних формул для розрахунку показника мобільності для кожного конкретного типу ґрунту [104-105, 154].

У випадку в'язкого ґрунту показник мобільності виражається наступною залежністю запропонованою Freitag [60]:

$$MN_{WES} = \frac{CI \cdot b \cdot d}{W_t} \left(\frac{\delta}{h} \right)^{0,5} \left(\frac{1}{1 + \frac{b}{2d}} \right) \quad (1.5)$$

де: W_t – навантаження на колесо, кН;

CI – несуча здатність ґрунту, визначена за допомогою пенетрометра, кПа;

δ – прогин шини (м) на твердій поверхні під навантаженням;

h – висота профілю шини у ненавантаженому стані, м;

d – вільний діаметр шини при номінальному тиску, м.

Для в'язко-фрикційних ґрунтів Wismer і Luth [186-187] розробили наступний вираз:

$$MN_{WES} = \frac{CI \cdot b \cdot d}{W_t} \quad (1.6)$$

Натомість для фрикційних ґрунтів показник мобільності запропонований Turnage [175] має вигляд:

$$MN_{WES} = \frac{G_{CI}(b \cdot d)^{3/2}}{W_t} \cdot \frac{\delta}{h} \quad (1.7)$$

де: G_{CI} – градієнт конусного індексу.

Основною причиною розбіжностей у записах було прагнення отримати достовірні оцінки тягового зусилля на різних типах ґрунтів — на основі вимірювання індексу несучої здатності CI (для піщаних ґрунтів метод потребує модифікацій, що зумовило введення градієнтного CI).

Показник мобільності у випадку коли усі сили зчеплення спрямовані на подолання опору руху, визначає мінімальну несучу здатність ґрунту, нижче якої транспортний засіб не може рухатися (рисунок 1.3).

Отже, після перетворення за формулою гранична несуча здатність суглинку за методом WES може бути виражена як [177]:

$$VCI_{WES} = \frac{k \cdot W}{2 \cdot n \cdot b \cdot d \cdot \left(\frac{\delta}{h}\right)^{0,5} \left(\frac{1}{1 + b/2d}\right)} \quad (1.8)$$

де:

k – граничне значення індексу MN при $\mu = 0$;

n – кількість осей транспортного засобу;

W – вага транспортного засобу, кН.

Протягом певного часу з низькою кореляцією [80,124] або її відсутністю [177] тягові зусилля в наукових дослідженнях визначалися на основі моделі VCI WES. Це спонукало Британське агентство з досліджень і оцінки оборони (DERA — нині QinetiQ) розробити більш детальний аналітичний метод дослідження для

визначення VCI, який отримав назву граничний конусний індекс транспортного засобу (Vehicle Limiting Cone Index, VLCI). Метод базувався на випробуваннях тягового зусилля на експериментальній моделі з одним ведучим колесом (змінювався розмір шини та навантаження, досліджувались лише радіальні шини). Шину прокочували по власній колії чотири рази для імітації багатовісного транспортного засобу. Більшість вимірювань як для коліс, так і для гусениць виконувались при змінному буксуванні (20–100%), але для порівняння проводились також вимірювання при постійному буксуванні в 20%. Рух коліс досліджувався в однакових ґрунтових умовах, а несуча здатність визначалася до проходу колеса шляхом втискання конуса.

На першому етапі результати були стандартизовані (як у методі WES) шляхом розробки власного показника мобільності, після чого характеристики тягової сили були подані як функція MN та описані формулою [154]:

$$P_{\mu} = W_t \left(0,8 - \frac{3,2}{MN_{DERA} + 1,95} \right) \quad (1.9)$$

На основі показника мобільності було встановлено його граничне значення ($MN_{gr} = 1,85$), при якому тягове зусилля дорівнює нулю) та визначено мінімальну несучу здатність ґрунту, що забезпечує прохідність за критерієм VLCI. Оскільки для колісних транспортних засобів показник мобільності визначається як [104]:

$$MN_{DERA} = \frac{CI \cdot b^{0,8} \cdot d^{0,8} \cdot \delta^{0,4}}{W_t} \quad (1.10)$$

то після перетворення:

$$VLCI = \frac{1,85 \cdot W}{2 \cdot n \cdot b^{0,8} \cdot d^{0,8} \cdot \delta^{0,4}} \quad (1.11)$$

Отримане співвідношення є дійсним для колісних схем від 4x4 до 8x8 [104] усі відмінності, зумовлені різною кількістю ведучих мостів, не перевищують 5%. Запис подібний до інших виразів, але з нього усунуто неоднозначну висоту шини “h” (яка може вимірюватись від протектора чи без нього, від центру диска чи від краю), а також індекс δ/h , який не дозволяє адекватно оцінити вплив деформації шини на площу контакту з ґрунтом.

Метод VLCI для колісних транспортних засобів дає результати, повністю узгоджені з методом VCI — розбіжності не перевищують 3% (для $RI = 0,7$). Проте у випадку гусеничних машин метод VLCI показує значення приблизно на 30% вищі (рисунок 1.4) за ті, що розраховані за методом VCI.

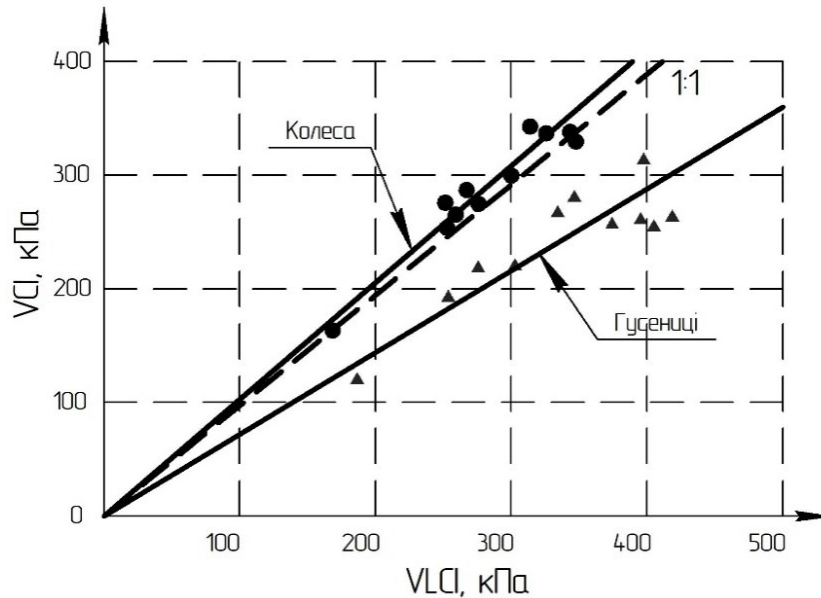


Рисунок 1.4 – Кореляція між значеннями VLCI та VCI [104]

Прийнята у методі формула індексу VLCI, що використовує показник прохідності MN для колісних транспортних засобів, дозволяє досягти високої кореляції між тяговими зусиллями та оціненими значеннями, отриманими під час випробувань (рисунок 1.5), і є суттєвим прогресом порівняно з моделлю WES (див. рисунок 1.6). Водночас її достовірність і актуальність для оцінки тягових зусиль транспортного засобу не були експериментально підтверджені. Врахування реальної взаємодії між компонентами ходової частини та силової установки може суттєво вплинути на отримані характеристики тяги.

Граничне значення показника MN також викликає сумніви. Згідно з експериментальними дослідженнями [154], для досягнення технічного рівня прохідності (здатності одноразового подолання ділянки місцевості) через її неоднорідність необхідний певний мінімальний надлишок тягового зусилля (коефіцієнт зчеплення у межах $\mu = 0 \div 0,1$).

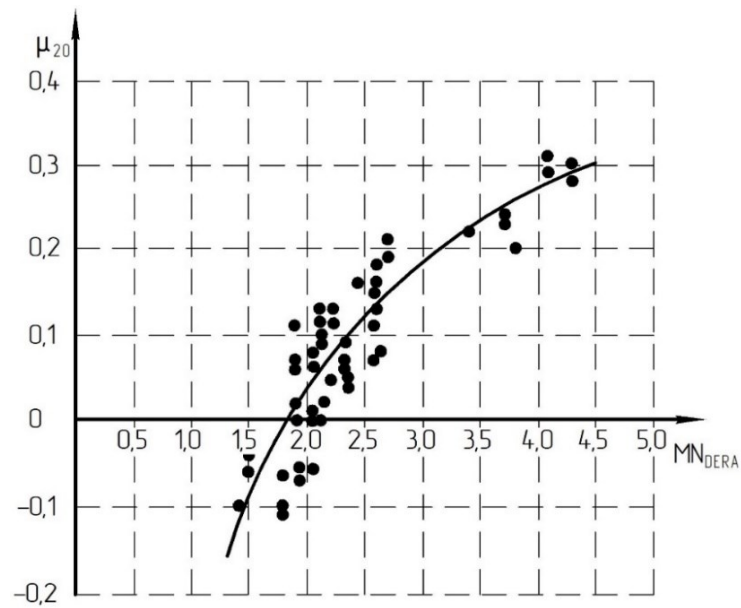


Рисунок 1.5 – Залежність коефіцієнта зчеплення μ_{20} від показника мобільності MN_{DERA} [104]

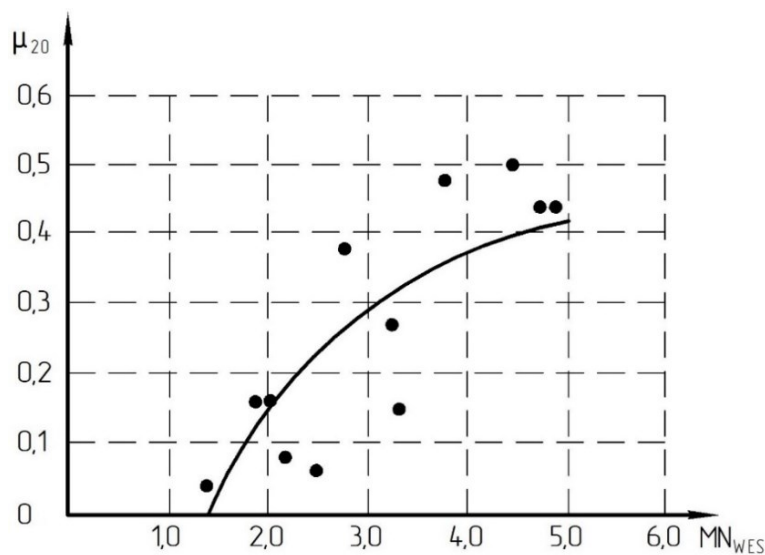


Рисунок 1.6 - Залежність коефіцієнта зчеплення μ_{20} від показника мобільності MN_{WES} [104]

Прийняте значення $MN = 1,85$ не відповідає цій умові оскільки дані вимірювань (рисунок 1.5) свідчать про те, що граничне значення має бути не менше ніж $MN (\mu = 0 \div 0,1) = 2,15$. Цей висновок також узгоджується з результатами моделі WES, які вказують на те, що у випадку колісних транспортних засобів взаємодії, що виникають у ходовій частині та силовій установці, знижують здатність до подолання пересіченої місцевості. У цьому контексті метод VLCI є

перспективним, однак він потребує експериментальної верифікації з використанням реальних транспортних засобів.

У Великій Британії для оцінки мобільності військової техніки застосовується запропонований на початку 70-х років Королівським науково-дослідним центром озброєнь Великої Британії метод оцінки несучої здатності ґрунту, що базується на визначенні максимальних тисків, що виникають в зоні контакту рушія з ОП [163]. В результаті аналізу розподілу напружень (деформацій) у ґрунті та опору руху гусеничних машин було встановлено, що умова подолання ґрунтів з низькою несучою здатністю полягає у тому, що середнє максимальне значення тиску (ММР, Mean Maximum Pressure), яке виникає під ведучими колесами, не повинно перевищувати допустимі значення несучої здатності ґрунту.

На основі експериментальних даних Rowland у 1971 році розробив емпіричні рівняння для оцінки значень ММР [142] залежно від ряду конструктивних параметрів гусеничної техніки. Згодом концепцію ММР було поширено на оцінку прохідності військових колісних машин [143-144]. Цей показник був прийнятий Міністерством оборони Великої Британії для класифікації прохідності військової техніки у стандарті Defence Standard 23-6 [30], як показано в таблиці 1.1

Таблиця 1.1 - Класифікація прохідності легких вантажівок відповідно до Британського оборонного стандарту 23-6 [30]:

Критерій	Клас мобільності				
	Висока	Підвищена середня	Середня	Підвищена низька	Низька
ММР, кПа	<280	280-350	350-550	550-700	>700

Для оцінки, чи забезпечує транспортний засіб із певним значенням середнього максимального тиску належну прохідність по заданій місцевості, Rowland запропонував набір оптимальних (цільових) значень ММР для різних типів ґрунтів, наведений у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Оптимальні значення ММР для різних типів ОП [143-144]:

ОП	ММР, кПа		
	Відмінно	Задовільно	Допустимо
Волога дрібнозерниста			
- помірна широта	150	200	300
- тропічна широта	90	140	240
Торф	30	50	60
Болото	5	10	15
Сніг	10	25-30	40

Емпіричну формулу для оцінювання значення ММР для колісних машин було запропоновано у [104]. Вона базується на чисельній моделі взаємодії ґрунту і шини, розробленій WES, і має вигляд:

$$ММР = \frac{W}{n \cdot m \cdot b^{0,8} \cdot d^{0,8} \cdot \delta^{0,4}} \quad (1.12)$$

де: b — ширина шини, у дюймах;

d — вільний діаметр шини, у дюймах;

m — загальна кількість осей;

n — кількість коліс на одній осі;

W — повна маса транспортного засобу, у фунтах;

δ — прогин шини на твердій поверхні, у дюймах.

Виявлено, що для колісних транспортних засобів індекс конуса для одного проходу (VCI_1) може бути пов'язаний із середнім максимальним тиском (ММР) за наступним виразом [136]:

$$VCI_1 = 2,53 + 1,35 \cdot ММР \quad (1.13)$$

Проте, щоб зберегти збіжність показників $VCI/ММР$ для гусеничних машин і досягти високої кореляції з результатами випробувань колісних машин, Larminie модифікував формулу, яка набула вигляду [97]:

$$MMP = \frac{k \cdot W}{2 \cdot n \cdot b^{0,85} \cdot d^{1,15} \cdot (\delta/h)^{0,5}} \quad (1.14)$$

де:

k — коефіцієнт кількості ведучих осей;

W — вага транспортного засобу, кН;

b — ширина шини, м;

d — зовнішній діаметр шини, м;

δ — прогин шини на твердих поверхнях, м;

h — висота профілю шини, м.

На основі визначеної за рівнянням несучої здатності, Rowland запропонував вираз для розрахунку показника мобільності [143]:

$$MN_R = \frac{k \cdot n \cdot CI \cdot b^{0,85} \cdot d^{1,15}}{W_t} \sqrt{\frac{\delta}{h}} \quad (1.15)$$

За допомогою цього виразу можна визначити разове тягове зусилля, проте висока точність забезпечується лише на ділянках із низькою несучою здатністю ґрунту, для ґрунтів з доброю несучою здатністю рекомендується використовувати показник мобільності для діагональних шин [31], розроблений Brixius W.W. (компанія John Deere):

$$MN_B = \frac{CI \cdot b \cdot d}{W_t} \left(\frac{1 + 5 \frac{\delta}{d}}{1 + 3 \frac{b}{d}} \right) \quad (1.16)$$

Необхідна несуча здатність ґрунту для багаторазових проходжень за методом MMP визначається за формулою:

$$CI_n = k_n \cdot MMP \quad (1.17)$$

де k_n — коефіцієнт кількості проходжень (таблиця 1.3)

Таблиця 1.3 Залежність коефіцієнта кількості проходів k_n від кількості проходжень

Кількість проходжень	1	2	5	10	25	50
Коефіцієнт кількості проходжень	1	1,2	1,53	1,85	2,35	2,80

Широке розповсюдження широкопрофільних шин призвело до того, що співвідношення δ/h більше не відображає адекватного збільшення контактної площі шини з ґрунтом при зниженні тиску. У шинах з низьким та широким профілем фактична деформація δ та контактна площа були значно меншими, ніж у шин із нормальним профілем при тому ж значенні δ/h .

Оновлений підхід до розрахунків дозволив уточнити коефіцієнт ММР шляхом модифікації коефіцієнта "к":

$$ММР = \frac{k_2 \cdot W}{2 \cdot n \cdot b^{0,85} \cdot d^{1,15} \cdot (\delta/h)^{0,5}} \quad (1.18)$$

У подальших дослідженнях були розроблені моделі ММР для транспортних засобів, оснащених здвоєними колесами, колесами різних розмірів, а також для руху по піщаних ґрунтах [154].

Загалом використання ММР як критерію прохідності ставиться під питання з таких причин [193, 79-80]:

1) Емпіричні рівняння для оцінки ММР залежать виключно від обмеженої кількості конструктивних параметрів транспортного засобу й не враховують властивості ґрунту.

2) Експериментальні дані свідчать, що значення ММР істотно залежить від поведінки ґрунту, що вказує на невідповідність методології ММР фізичній природі взаємодії машини з поверхнею. Існує недостатній рівень довіри до точності емпіричних рівнянь для оцінювання ММР.

3) Використання конкретних значень ММР для класифікації прохідності машин не завжди є доцільним, оскільки це може спонукати розробників або виробників транспортних засобів до маніпулювання окремими конструктивними параметрами у формулах розрахунку ММР з метою досягнення певного, умовно встановленого порогового значення, замість стимулювання пошуку інноваційних способів покращення фактичної прохідності машини в польових умовах.

1.3 Аналіз методів оцінки прохідності військових КТЗ в країнах колишнього СРСР

Усі вимоги щодо оцінки опорної прохідності в «Східній» наковій школі встановлені у ГОСТ РВ 52048-2003 [225] та ГОСТ 22653-77 [226] і охоплюють наступні 18 нормативних показників:

1. Зчіпна вага автомобіля - частина ваги автомобіля, що створює нормальні навантаження ведучих коліс автомобіля:

$$G_{zn} = m_{zn} \cdot g = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^m R_{zy} \quad (1.19)$$

де m -число ведучих осей; R_{zy} - нормальна реакція, що діє на i -е колесо j -ої ведучої осі автомобіля, Н.

2. Коефіцієнт зчіпної зчіпної ваги автомобіля - відношення зчіпної ваги автомобіля до повної ваги автомобіля

$$G_{zn} = \frac{m_{zn}}{m_a} = \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^m R_{zy}}{G_a} \cdot \cos \alpha \quad (1.20)$$

де- α кут поздовжнього нахилу дороги.

Умова можливості руху автомобіля по зчепленню ведучих коліс з ОП $\varphi_x \cdot G_a \geq \psi \cdot G_a$, звідки $\frac{G_{zn}}{G_a} k_{zn} \geq (f + i) \cdot \varphi_x$,

де f -коефіцієнт опору руху автомобіля; i -коефіцієнт опору підйому; φ_x -коефіцієнт зчеплення коліс з ОП.

3. Питома потужність автомобіля - відношення номінальної потужності двигуна до повної маси автомобіля:

$$P_{nm} = \frac{N_{e \max}}{m_a} \quad (1.21)$$

де m_a -повна маса автомобіля, кг.

4. Потужність, що витрачається на подолання опору коченню - потужність, що дорівнює сумі потужностей опору коченню коліс автомобіля

$$N_f = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n N_{fij} \quad (1.22)$$

де n -число осей автомобіля; N_{fij} -потужність опору коченню i -го колеса j -ої осі,

5. Потужність опору руху автомобіля, що дорівнює сумі потужності опору коченню і потужностей, що витрачаються на подолання тертя в трансмісії, опору підйому, інерції, повітря тощо.

6. Потужність утворення колії автомобіля - частина потужності опору коченню автомобіля, що витрачається на деформування ОП рушієм автомобіля.

7. Повна сила тяги автомобіля - сила тяги автомобіля, що дорівнює сумі сил тяги ведучих коліс автомобіля:

$$F_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n F_{Tij} \quad (1.23)$$

де m -число ведучих осей; F_{Tij} -сила тяги i -го ведучого колеса j -ої ведучої осі, Н.

8. Вільна сила тяги автомобіля - сила, що рівна різниці між повною силою тяги автомобіля, що рівномірно рухається по горизонтальній ОП і сумою сили опору повітря.

9. Коефіцієнт вільної тяги автомобіля - відношення вільної сили тяги автомобіля до повної ваги автомобіля:

$$k_{em} = \frac{F_{em}}{G_a} \quad (1.24)$$

10. Сила тяги на гаку автомобіля – сила, що діє на автомобіль з боку причепа.

11. Питома сила тяги на гаку автомобіля -сила тяги на гаку автомобіля, віднесена до повної ваги автомобіля:

$$k_{zn} = \frac{F_{mz}}{G_a} \quad (1.25)$$

12. Тягова потужність на гаку автомобіля - потужність, рівна добутку сил тяги на гаку автомобіля на швидкість руху автомобіля:

$$N_{mz} = F_{mz} \cdot V \quad (1.26)$$

13. Питома тягова потужність на гаку автомобіля - потужність, рівна відношенню тягової потужності на гаку автомобіля до повної маси автомобіля:

$$N_{nmz} = \frac{N_{mz}}{m_a} \quad (27)$$

14. Тиск коліс на дорогу оцінюють середнім тиском колеса в контакті і середнім тиском колеса по виступах протектора. Середній тиск колеса в контакті дорівнює відношенню нормальної реакції ОП на колесо до контурної площі контакту, а середній тиск колеса по виступах малюнка протектора - відношенню до площі контакту по виступах малюнка протектора

$$p_k = \frac{R_z}{A_k} \quad (1.28)$$

$$p_k = \frac{R_z}{A_k} \quad (1.29)$$

Середній тиск p_k і p_{np} пов'язані через коефіцієнт насиченості протектора

$$p_{np} = \frac{p_k}{K_n} \quad (1.30)$$

де K_n -відношення площі контакту по виступах до контурної площі контакту.

15. Тягово-швидкісна характеристика автомобіля на заданій ділянці місцевості, що представляє залежність питомої сили тяги на гаку від швидкості автомобіля на різних передачах трансмісії.

16. Залежність потужності опору коченню від швидкості руху автомобіля.

17. Здатність подолання важкопрохідних ділянок шляху - експериментально граничний рівень прохідності при подоланні розмокших ґрунтових ділянок (суглинок, чорнозем або болото) з низькою несучою здатністю.

18. Найбільша глибина снігового шару - експериментально граничний рівень прохідності при подоланні важкого снігового бездоріжжя.

Паралельно протягом останніх десятиліть групою дослідників «Східної школи» запропоновано низку комплексних показників оцінки прохідності.

Агейкін Я. С. [214] для оцінки прохідності запропонував нерівність:

$$k_{3ч} \cdot \varphi \geq f_c + (1 - k_{3ч}) \cdot f_{ui} + f_k + f_{\bar{o}} + tg\alpha \quad (1.31)$$

де $k_{зч}$ -коефіцієнт зчіпної ваги; φ - коефіцієнт зчеплення; α - кут підйому; f_r , $f_{ш}$ - коефіцієнти опору ґрунту, шини коченню; f_b -коефіцієнт бульдозерного опору; f_k -коефіцієнт опору руху.

Перелік показників запропонований Бабковим В. Ф. [220]

$$P = \varphi - f \quad (1.32)$$

$$\lambda_c = \frac{V}{V_p} \quad (1.33)$$

$$\lambda_T = \frac{G_{зп}}{G_{зсп}} \quad (1.34)$$

$$\lambda_E = \frac{Q}{Q_p} \quad (1.35)$$

$$\lambda_p = \frac{N}{N_p} \quad (1.36)$$

де P - показник прохідності; φ - коефіцієнт зчеплення; f -коефіцієнт опору коченню; $\lambda_{C,T,E,P}$ - коефіцієнти швидкості, вантажності, економічності, працездатності; V , G , Q , N -швидкість руху машини, вантажопідйомність, витрата палива, пропускна здатність; індекс «р» позначає рух по дорогах з удосконаленим покриттям.

В [224] Гмошинський В. Г. прохідність визначає по співвідношенню тисків:

$$\alpha = \frac{P_{max}}{P} \quad (1.37)$$

де p_{max} - максимальний тиск, Па; p -середній тиск, Па.

Гребенщиков В.І. [227] запропонували оцінювати прохідність за конструктивним показником:

$$K = \frac{k_T \cdot k}{q_{vc}} \quad (1.38)$$

де k_T -питоме тягове зусилля, Н; k - коефіцієнт зчіпної ваги;

$$q_{vc} = \frac{2 \cdot G_a}{z \cdot D \cdot B} \quad (1.39)$$

де G_a -повна вага машини, Н; z -число коліс; D -діаметр шини, м; B – ширина шини, м.

1.4 Аналіз дослідження впливу тиску повітря в шинах на прохідність бездоріжжям

Аналіз умов експлуатації показує, що для автомобілів підвищеної прохідності типовим є рух по покриттях з різним ступенем нерівномірного розподілу опору коченню та зчеплення. У зв'язку з цим виникає потреба в реалізації необхідної сили тяги в різних умовах експлуатації, для забезпечення достатнього рівня мобільності, що зумовлює необхідність застосування заходів, спрямованих на забезпечення потрібної ефективності за рахунок підвищення середніх швидкостей руху та зниження затрат енергії на подолання опору рухові.

Проаналізувавши всі доступні математичні моделі взаємодії шин з ОП, можна констатувати, що прохідність колісних транспортних засобів залежить від конструктивних параметрів автомобіля. До таких параметрів можна віднести компоновку шасі, навантаження на осі, ширину та висоту профіля шин їх діаметр та радіальну деформацію. Оскільки єдиним змінним параметром є радіальна деформація, яка в свою чергу залежить від тиску в шині, то проблема покращення показників взаємодії шини з ОП зводиться до забезпечення оптимального значення тиску в шинах автомобіля. Саме тиск у шинах є одним із небагатьох регульованих факторів, що дозволяють «адаптувати» поведінку транспортного засобу до різних ґрунтових умов і підвищити його прохідність на м'яких або нестійких поверхнях.

Результатом численних дослідження впливу тиску повітря в шинах на прохідність колісних машин по ґрунтах з низькою несучою здатністю стала розробка системи централізованого регулювання тиску. Історія систем централізованого регулювання тиску в шинах STIS починається з середини ХХ століття. Перші експерименти та розробки подібних систем були проведені під час Другої світової війни, коли потреба у підвищенні мобільності військової техніки на різних типах місцевості стала надзвичайно актуальною. Тоді було помічено, що

можливість змінювати тиск у шинах на ходу значно покращує прохідність і знижує ризик іммобілізації. Після війни CTIS почала впроваджуватися на колісних військових машинах, поступово ставши стандартним обладнанням для багатьох армій світу. Її розвиток і вдосконалення відбувалися в 1950–1970-х роках, коли вдосконалювалися як механічні, так і пневматичні компоненти системи. У 1980–1990-х роках CTIS почали широко застосовувати і в цивільній техніці, особливо у важкій будівельній і сільськогосподарській техніці, що працює на складних ґрунтах.

Дослідження демонструють позитивний вплив зниження тиску на прохідність транспортного засобу по бездоріжжю. Так у 1998 році експериментально встановили, що зменшення тиску в шинах призводить до зменшення тиску в зоні контакту ґрунт–шина поблизу центру плями контакту, а також до збільшення довжини зони контакту шини з поверхнею ґрунту [12]. Дослідження впливу тиску в шинах і динамічного навантаження на ущільнення ґрунту для шини показали, що зменшення тиску в шині при сталому динамічному навантаженні сприяє зниженню об'ємної густини ґрунту, індексу проникнення та глибини колії. Акцентовано увагу на недолік, пов'язаний як із недостатнім, так і з надмірним тиском у шинах — це скорочення строку їх експлуатації, недостатній тиск спричиняє аномальну деформацію шини, що призводить до пошкодження корду, розшарування боковин. Проблему ресурсу шин було частково вирішено на початку 1990-х років, коли Асоціація шин і ободів (Tire and Rim Association) прийняла нову таблицю навантажень і тисків, яка знизила мінімально допустимий тиск до 40 кПа.

Pletts T. [132] описав коротку історію CTIS яка бере свій початок з часів Другої світової війни, коли ця технологія була розроблена для поліпшення мобільності транспорту на поганих дорогах в Радянському Союзі та країнах Варшавського договору, також він вказав, що південноафриканська промисловість цукрової тростини визначила CTIS як технологію, яка може поліпшити характеристики транспортних засобів і зменшити транспортні витрати, але він

підкреслив, що в даний час найбільше застосування CTIS має в лісовій промисловості.

Лісова служба США (USDA Forest Service) розпочала дослідження CTIS з вивчення пошкоджень доріг і провела польові випробування в Айдахо та Вашингтоні [172-173], а також інші дослідження в Алабамі [17]. За результатами досліджень, пошкодження доріг зменшилися, а експлуатаційні характеристики транспортних засобів покращилися в несприятливих умовах. На ґрунтових дорогах рух важких вантажівок є однією з головних причин осадження [59] тому USDA протестувала CTIS і виявила, що зниження тиску в шинах може зменшити осадження на 38% [59]. Moore і Sowa [114] також зазначили, що випробування Служби лісового господарства США підтвердили, що зниження тиску в шинах легкових і важких вантажних автомобілів на 40-60% (340-420 кПа) від стандартного тиску для шосе значно зменшило колії та ерозію доріг без твердого покриття. Випробування, проведені Sturos [171] на лісовозних вантажівках, показали, що зниження тиску в шинах зменшило середнє навантаження, виміряне в тестах на опір коченню на дорогах з сипучим піском, на 45% і збільшило тягу. Трирічне дослідження осадження в Орегоні (США) продемонструвало, що використання єдиного постійного зниженого тиску в шинах призвело до зменшення осадження в середньому на 45%. Змінюючи тиск в шинах за допомогою CTIS, осадження було зменшено в середньому на 80% [28].

Jokai та Webb в своєму проекті [85] оцінювалося використання зниженого тиску в шинах і тривісних тягачів для поліпшення мобільності транспортних засобів в умовах м'якого піску. Результати показали, що збільшення площі контакту з поверхнею кермової шини за допомогою ширшої шини зі зниженим тиском може поліпшити плавучість і зменшити бульдозерний ефект шин керованої осі. Зниження тиску в шинах для тандемного трактора забезпечило помітне поліпшення тяги, незважаючи на збільшення загальної маси автопоїзда на 8000 кг, а конфігурація тридедного трактора з низьким тиском в шинах продемонструвала найкращу мобільність під час маневрування і не вимагала буксирування. Bulley і Blair [32] розробили модель, яка допомагає підвищити прохідність лісовозів за

допомогою зниження тиску в шинах на приводних колесах у Британській Колумбії (Канада). Тиск у приводних шинах було знижено з 690 до 410 кПа, і під час спроби підйому на ухил до завдяки зниженню тиску в шинах середня довжина сліду шини збільшилася з 28 до 38 см. Вантажівки зі зниженим тиском в приводних шинах відразу ж отримали перевагу від збільшення сліду шини і змогли піднятися на пагорб без допомоги, тоді як вантажівки, що працювали з нормальним високим тиском в шинах (690 кПа), потребували допоміжного транспортного засобу для кожного вантажу.

Clark [38] зазначив, що використання шин із зниженим тиском збільшує стійкість до проколів та пошкоджень протектора. При зниженні тиску в шинах піковий крутний момент приводної осі зменшується, що може знизити ризик виходу з ладу приводної системи. Зниження тиску в шинах також зменшує одиничне навантаження на дорожнє покриття, що може призвести до кращої тяги шин, меншого ковзання коліс і меншого пошкодження дороги. Зменшення ковзання коліс призводить до поліпшення тяги на 17-19% за на різних ОП та навантаженнях на вісь [17, 171]. Інше дослідження, проведене USDA в Айдахо [133], показало, що STIS може збільшити кількість робочих днів завдяки покращенню тяги та плавучості транспортного засобу. Коли мокрі дорожні умови погіршувалися до такого стану, що робота не могла продовжуватися, використання STIS дозволяло продовжувати роботу завдяки збільшенню тяги.

Проект ROADEX Європейського Союзу, що був запланований на період 1998–2007 років [115] і є транснаціональним дослідженням в галузі дорожнього будівництва, спрямованим на розробку способів інтерактивного та інноваційного управління дорогами з низьким рівнем трафіку в холодних кліматичних регіонах північної периферії Європи. Випробування системи контролю тиску в шинах було проведено на лісовозі в Кінбрейсі на півночі Шотландії з жовтня 2006 року по листопад 2007 року. Основні висновки цих випробувань включали наступне:

- контроль тиску в шинах є перспективною технологією для важких транспортних засобів, які використовуються як на дорогах, так і поза ними;

- протягом 13 місяців випробувань було виявлено короткострокові переваги щодо терміну експлуатації шин, управління шинами, тяги транспортних засобів, мобільності транспортних засобів та подовження сезону перевезень, що підтверджує результати подібних випробувань у Канаді та Швеції;
- для повної оцінки системи необхідний більш тривалий період випробувань.

Досвід використання CTIS/ITPCS у Великобританії також показав, що ця технологія може забезпечити на 34% кращу тягу на піску та на 17% кращу тягу на бруді, згідно з отриманими результатами [13].

В Ірландії CTIS було запропоновано для мінімізації зносу та пошкодження дорожнього покриття при збільшенні вантажопідйомності лісовозів з метою отримання кращої економічної віддачі [105]. Інше ірландське дослідження дійшло висновку, що вантажні автомобілі з системами управління змінним тиском в шинах, такими як CTIS, можуть мінімізувати пошкодження гнучкого дорожнього покриття з тонким асфальтовим шаром і торф'яним ґрунтом. Це може покращити експлуатаційні характеристики дорожнього покриття, що лежить на торф'яному або іншому ґрунті [126]. Останнє дослідження також показало, що є докази того, що порожній вантажний автомобіль з високим тиском в шинах (770 кПа) спричиняє таку ж втому дорожнього покриття, як і повністю завантажений вантажний автомобіль, що експлуатується з низьким тиском в шинах (350 кПа) [127].

З появою цифрових технологій у XXI столітті системи регулювання тиску отримали автоматизований контроль із можливістю інтеграції з іншими системами управління транспортним засобом. Таким чином, CTIS пройшла довгий шлях від експериментальної ідеї до сучасних комплексних систем, що забезпечують підвищену ефективність, безпеку та комфорт руху в складних дорожніх і ґрунтових умовах.

1.5 Узагальнення проблеми, мета і завдання дослідження

Проаналізувавши результати наукових досліджень та роботи вищезгаданих авторів щодо дослідження опорної прохідності автомобілів багатоцільового

призначення, а також методів оцінки її показників, можна зробити наступні висновки:

1. Підвищення опорної прохідності є комплексним завданням, що обумовлює необхідність удосконалення методики розрахунку показників опорної прохідності, яка має ґрунтуватися на теорії кочення колеса, теорії автомобіля та основних законах механіки ґрунтів

2. Розроблені на сьогодні математичні моделі взаємодії колеса з ОП не мають завершеності, необхідної точності та достатньої універсальності, що не дозволяє легко реалізувати їх при практичному моделюванні процесу. І це вимагає проведення подальших досліджень.

3. Усіма вищеназваними авторами визнається значущість процесу регулювання тиску повітря в шинах, більшість із них приділяють цьому фактору значну увагу у своїх дослідженнях впливу конструктивних факторів на прохідність КТЗ.

4. Незважаючи на загальновизнане величезне значення зміни тиску повітря в шинах при русі в умовах бездоріжжя, дуже мало уваги приділяється необхідності встановлення раціонального тиску повітря в кожному КР залежно від типу ОП, навантаження, що припадає на колеса, та умов взаємодії колеса, що деформується, з ґрунтом.

Тому, *метою дисертаційного дослідження* є підвищення прохідності повноприводних автомобілів на бездоріжжі через розробку методики кількісної оцінки взаємозв'язку показників прохідності з характеристиками автомобіля, тиском в шинах, фізико-механічними властивостями ОП та, відповідно, формування практичних рекомендацій по конструктивному синтезу системи роздільного регулювання тиску в шинах автомобілів багатоцільового та військового призначення.

Для досягнення мети поставлені наступні *завдання*:

- огляд і аналіз існуючих нормативних баз та наукових досліджень у сфері прохідності автомобілів;

- розробка математичної моделі і дослідження мобільності повноприводних автомобілів на бездоріжжі у взаємозв'язку з тиском повітря в шинах та різними типами ОП;
- проведення експериментальних досліджень, аналіз отриманих результатів і оцінка адекватності розробленої комп'ютерної моделі;
- формування рекомендацій щодо роздільного регулювання тиску в шинах;
- формування практичних рекомендацій по конструктивному синтезу системи роздільного регулювання тиску в шинах автомобілів багатоцільового та військового призначення.

1.6 Висновки за розділом

Представлені методи оцінки прохідності «Західної» наукової школи базуються на емпіричних залежностях, тому отримання достовірних результатів розрахунків і аналізу залежить від того чи всі величини подаються у визначених одиницях виміру та параметри ґрунту, по якому здійснюватиметься рух, не мають значних відмінностей від параметрів, при яких проводилися випробування. Точність оцінки здатності прохідності та тягового зусилля значною мірою залежатиме від якості прийнятої моделі показника прохідності, неоднорідність ґрунту та широкий діапазон змін його параметрів унеможливають створення універсальної моделі.

Важливе значення мають також конструктивні рішення ходових систем, особливо швидкий розвиток технологій виробництва шин зумовлює постійну необхідність у верифікації формул та вихідних припущень. З огляду на наявні дані, надійним методом оцінки наявних тягових зусиль наразі є метод MN.

Щодо показників оцінки прохідності які пропонуються «Східною» науковою школою слід констатувати, що деякі з них за своїм фізичним змістом являють собою запас питомої сили тяги або питомої потужності, що дозволяє провести порівняльну оцінку прохідності декількох автомобілів при русі по конкретній ділянці місцевості, разом з тим, їх незручно використовувати при порівняльній оцінці прохідності в різних ґрунтових умовах. Решта показників оцінюють

прохідність машин по відношенню максимального тиску до середнього тиску, а також глибині занурення, що є дуже важливо, проте їх застосування при порівняльній оцінці декількох автомобілів досить проблематично, так як вони є непрямими і не дають прямої оцінки прохідності. З цієї точки зору підходи «Західної школи» є більш прикладними і систематизованими.

При зниженні тиску повітря в шинах зменшується тиск на ґрунт, збільшується площа плями контакту, зменшується глибина утвореної колії, водночас зростає деформація шини, що тягне за собою збільшення втрат на внутрішнє тертя в оболонці шини, також зменшується максимально допустима швидкість руху та знижується ресурс шини. Отже, в залежності від фізико-механічних характеристик ОП існують оптимальні значення тиску повітря в шинах. Через неоднорідність ґрунту та різне вертикальне навантаження на осі автомобіля умови взаємодії з ОП для кожного колеса відрізняються і зазвичай колеса другої і наступних осей рухаються вже по зміненому колесами передньої осі ґрунту, який відрізняється більшою щільністю. В результаті цього деформація та відповідно радіуси кочення передніх і задніх коліс є різними, звідси випливає, що виникає певний запас по тяговому зусиллі на кожній з наступних осей, який нажалі нівелюється системою централізованого регулювання тиску в шинах. Тому забезпечення оптимального для кожного колеса значень тиску в шинах може бути ефективним інструментом підвищення прохідності колісних автомобілів.

У підсумку можна констатувати про необхідність подальших досліджень для встановлення оптимального тиску в шинах залежно від типу місцевості, а також розробки засобів підтримання цього тиску автоматично, без урахування досвіду водія.

РОЗДІЛ II. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ АВТОМОБІЛЯ БЕЗДОРІЖЖЯМ

2.1 Математичні моделі взаємодії шини з опорною поверхнею, що деформується

Вибір імітаційного моделювання як основного методу дослідження обумовлений складністю процесів, що визначають прохідність повноприводних автомобілів, які характеризуються нелінійною взаємодією великої кількості взаємопов'язаних параметрів, зокрема характеристик двигуна і трансмісії, розподілу навантаження по осях, тиску в шинах, їх геометричних і деформаційних властивостей та умов взаємодії ОП. Аналітичний опис такої системи у замкненому вигляді є ускладненим, а проведення повномасштабних експериментальних досліджень потребує значних матеріальних витрат і не забезпечує відтворюваності ґрунтових умов та оперативної зміни конструктивних параметрів транспортного засобу. Імітаційне моделювання дозволяє відтворити роботу автомобіля як сукупності взаємодіючих підсистем, об'єднуючи експериментальні характеристики двигуна, моделі трансмісії, регулювання тиску в шинах і параметри контакту шини з ОП в єдиному розрахунковому середовищі. Це забезпечує можливість проведення серії чисельних експериментів із контрольованими умовами, дослідження впливу окремих параметрів на показники мобільності та оцінювання ефективності роздільного регулювання тиску в шинах без створення фізичних прототипів, що робить імітаційне моделювання науково обґрунтованим і доцільним методом дослідження у даній роботі.

На даному етапі метою дослідження є огляд існуючих моделей тяги та визначення найбільш придатної для поширених українських ґрунтів шляхом вивчення впливу параметрів ґрунту, шин і на тягові характеристики транспортних засобів. Надійна математична модель процесу взаємодії шини та ґрунту дозволить аналізувати багато аспектів, пов'язаних із прохідністю транспортних засобів в різноманітних умовах. Взаємодія колеса з ґрунтом відіграє ключову роль у

мобільності транспортних засобів на складних ділянках місцевості, наукові дослідження [194] показують, що близько 20–55 % потужності, що передається на ведучі колеса, витрачається на взаємодію шини з ґрунтом. Протягом останніх десятиліть було розроблено різноманітні методи визначення параметрів взаємодії шин з ОП в умовах бездоріжжя та досягнуто значного прогресу в кількісному описі взаємодії шини з ОП, що деформується. Усі відомі методи можна класифікувати за трьома підходами: аналітичні, напівемпіричні та емпіричні. Однак через прив'язку цих методів до місцевості де проводилися досліді, придатність цих рівнянь в умовах українських ґрунтів наразі невідома.

Аналітичні методи є простими в застосуванні і дають змогу розуміти основні аспекти взаємодії колісного рушія з ОП [61]. Для того щоб передбачити ефективність роботи колісного рушія, достатньо знати розподіл нормальних і дотичних напружень у зоні контакту ґрунту з шиною або гусеницею, а також геометрію тривимірної контактної поверхні. Оскільки, в досліджуваному процесі присутня нелінійність геометрії та характеристик матеріалів, то метод скінченних елементів (МСЕ) є поширеним інструментом для дослідження таких складних задач. Nakashima [120] та Wong [99] застосовували метод МСЕ для аналізу взаємодії шин з ґрунтом. Yong та ін. [205] використали контактну теорію для прогнозування розподілу тиску між ґрунтом і колесом з метою задання граничних умов у своїй МСЕ-моделі. Yong [209], Yong і Fattah [207], а також Yong та ін. [208] застосували енергетичний підхід разом із МСЕ-моделлю для визначення втрат енергії, пов'язаних із деформацією ґрунту та шини. Вони також врахували ефект в'язко-пластичності у своїй моделі. В Інституті автомобільної техніки Університету Бундесверу в Гамбурзі Schmid [163] розробив модель взаємодії ґрунту з пружною шиною за методом скінченних елементів. Ґрунт у цій моделі описаний як еластопластичний матеріал, що характеризується критерієм текучості Друкера–Прагера. Шина моделювалася як три однорідні, пружні, концентричні кільця (протектор, корд і колісний диск). Fervers [58] розробив двовимірну МСЕ-модель, у якій корд шини був замінений еквівалентними силовими характеристиками деформації, а ґрунт також моделювався за критерієм Друкера–

Прагера з урахуванням обмеження об'єму. Nakashima та Oida [121] запропонували цікавий підхід, у якому поєднали метод дискретних елементів (МДЕ) із методом МСЕ для розв'язання задачі взаємодії шини з ґрунтом. Проте, складність задачі, необхідність у великій кількості параметрів ґрунту, а також недостатні знання про граничні умови є основними перешкодами для широкого застосування цього методу, попри беззаперечний прогрес у цьому напрямку.

Напівемпіричні підходи використовують два аналогові пристрої для моделювання взаємодії між ґрунтом і колісним рушієм. Вертикальна деформація ґрунту під навантаженням вважається аналогічною деформації ґрунту під плоскою плитою а деформація зсуву ґрунту розглядається як подібна до зсуву, спричиненого крутильним зсувним пристроєм або прямокутною пластиною з протектором. Зазвичай для отримання необхідних фізико-механічних параметрів ґрунту застосовується пристрій, відомий як беваметр. Нормальний тиск під плоскою плитою приймається у вигляді залежності, наведеної в джерелах [23-25].

$$p = \left(\frac{K_c}{b} + K_\varphi \right) z^n \quad (2.1)$$

Попри існування кількох різних залежностей для опису зв'язку між дотичними напруженнями та деформацією ґрунту [23–25,206], найширше застосування в сільському господарстві має залежність, запропонована Janoshi і Nanamoto [83,84]:

$$\tau = \tau_{max} (1 - e^{-j/k}) \quad (2.2)$$

$$\tau_{max} = c + p \tan \varphi \quad (2.3)$$

Рівняння (49) його модифікації стали відправною точкою для подальшого визначення опору коченню, що виникає через деформацію ґрунту у роботах Bekker [23–25], Агеїкіна [5, 6], Wong [195], Plakett [131], Garber і Wolf [68], Perdok [130], McRae [109], Garbari [66], Shuring [164], Yasui [204], Hetherington і Littleton [81], Abdel-Fattah та ін. [1], Garber і Swartzman [67], Wong [190–192], Kogure та ін. [93], Kim і Shin [90], Sandu [147-153] а також Muro [117]. Bekker [23–25], Yong [210] та Wong [194, 195] надали математичні деталі для оцінки опору коченню і тягового зусилля, що виникають на ведучому колесі. У роботі [194] Wong стверджує, що:

$$z_0 = \left(\frac{p_{gr}}{K_c/b + K_\varphi} \right)^{1/n} \quad (2.4)$$

$$MR = \frac{bp_{gr}^{(n+1)/n}}{(n+1)(K_c/b + K_\varphi)^{1/n}} \quad (2.5)$$

Bekker [25] розробив вираз для критичного тиску для пневматичних шин, при перевищенні якого вони поводитимуться як жорстке колесо. Вираз для критичного тиску наведений наступним чином:

$$p_{gcr} = (K_c/b + K_\varphi)^{1/(2n+1)} \left[\frac{3W}{(3-n)b\sqrt{D}} \right]^{2n/(2n+1)} \quad (2.6)$$

Fujimoto [65], Perdok [130] та Wong [195] розглядали деформовані пневматичні шини як жорсткі колеса більшого діаметра. Wills та ін. [185] і Bekker [24] наголошували на необхідності врахування просідання через пробуксовку при оцінці втрат енергії на ущільнення ґрунту. Wolf та ін. [188] виявили, що зсувні характеристики ґрунту разом із периферійною гнучкістю шин добре корелюють із продуктивністю колеса. Mussel та ін. [118] чисельно моделювали роботу позашляхових шин, розглядаючи миттєвий баланс сил між елементами ґрунту та шини. Вони врахували вплив швидкості на характеристики зсувної деформації ґрунту і дійшли висновку, що ефект швидкості руху шини не можна ігнорувати при прогнозуванні її ефективності.

Вищезазначений напівемпіричний підхід, який базується на рівняннях 2.1 та 2.3, прогнозує тягові характеристики гусениць для різних типів ідеалізованого розподілу тиску на межі контакту ґрунт–шина. Хоча вимірний розподіл тиску під шиною був далеко не рівномірним, нерівномірність розподілу тиску мала певний вплив на тягові зусилля шини.

Основою емпіричного підходу є згаданий вище конусний індекс ґрунту, який використовується як єдиний параметр міцності (твердості) ґрунту. На основі численних випробувань, проведених у WES, переважно на дрібнозернистих вологих глинах і крупнозернистому сухому піску, було розроблено показник VCI для встановлення критеріїв прохідності для військової техніки [60, 61, 195].

Значення базуються на вимірних показниках конусного індексу ґрунту. Більшість емпіричних залежностей для прогнозування тяги базуються на показниках мобільності, розглянутих у розділі I.

Turnage [175] розробив наступні рівняння для опору коченню та тягового зусилля при пробуксовці 20%.

$$\frac{R}{W} = 0,04 + \frac{0,020}{MN - 2,5} \quad (2.7)$$

$$\frac{D_{20}}{W} = 0,80 - \frac{1,31}{MN - 2,45} \quad (2.8)$$

Wismer і Lut [186-187] розробили наступні широко використовувані рівняння для не ущільнених ґрунтів, простота яких, а також необхідність вимірювати лише один параметр міцності ґрунту (CI), сприяли широкому застосуванню цих рівнянь у Північній Америці:

$$\frac{MR}{W} = 0,04 + \frac{1,2}{MN} \quad (2.9)$$

$$\frac{T}{rW} = 0,75(1 - e^{-0,3MN \cdot S}) \quad (2.10)$$

Ці рівняння є дійсними для таких умов:

$$\frac{b}{d} \approx 0,3; \quad \frac{\delta}{h} \approx 0,2; \quad \frac{r}{d} \approx 0,475 \quad (2.11)$$

Murillo-Soto та Smith [116], Hayes та Ligion [78], Adsit та Clark [3,4], Bloome та ін. [26], Albright та ін. [9], а також Alimardani та ін. [11] мали різний рівень успішності у застосуванні цих рівнянь. Zoz [212] розробив графічний метод для прогнозування продуктивності тракторів. Wang і Domier [183] встановили, що метод Wismer і Luth працює не гірше, ніж параметричні або напівемпіричні методи прогнозування продуктивності подвійних шин, якщо у формулі чисельного показника колеса використовується еквівалентна ширина. Вони також надали вираз для еквівалентної ширини подвійних шин на основі значень індексу конуса ґрунту. Melzer [110, 111] порівнював кілька емпіричних методик, зокрема Wismer і Luth. Для глинистого ґрунту рівняння Wismer і Luth та його модифікація мали тенденцію недооцінювати силу тяги та крутний момент, отримані з радіальних шин. Bashford

та ін. [21], Byerly та ін. [33], Khalid та Smith [89], а також Clark [39,40] використовували більш узагальнену форму рівнянь з різними константами, що залежать від ґрунту і шин, для кращого прогнозування результатів польових або лабораторних випробувань. Ці результати свідчать про те, що хоча загальна форма рівнянь Wismer і Luth є придатною для застосування, але щоб підвищити точність, константи у цих рівняннях слід адаптувати відповідно до конкретних умов ґрунту і шин. Rummer та Ashmore [145] і Ashmore та ін. [18] додали до рівнянь типу Wismer і Luth для прогнозування продуктивності шин лісозаготівельної техніки, їхні рівняння мають вигляд:

$$\frac{T}{rW} = 0,47(1 - e^{-0,2MN \cdot S}) + 0,28 \left(\frac{W}{W_R} \right) \quad (2.12)$$

$$\frac{R}{W} = -0,10 \left(\frac{W}{W_R} \right) + \frac{0,22}{MN} + 0,20 \quad (2.13)$$

Vechinski та ін. [182] встановили, що ці рівняння добре працюють на відкритих, однорідних ґрунтах із новою шиною за умови оптимізації коефіцієнтів. Оптимізовані коефіцієнти відрізнялися від наведених у рівняннях менш ніж на 10%. Ці рівняння були достатньо гнучкими для прогнозування характеристик зношеної шини та зношеної шини з ланцюгами на відкритих однорідних ґрунтах. Проте вони виявилися недостатньо гнучкими для прогнозування продуктивності будь-яких шин, використаних у їхньому дослідженні, на менш однорідних ґрунтах із покриттям, характерним для лісових умов.

Спираючись на підхід із використанням показників мобільності Freitag і Turnage, Dwyer [52] розробив вирази для коефіцієнта опору коченню та чистої тяги при пробуксовці 20%, а також максимального чистого тягового зусилля [51, 53]. Ці рівняння згодом були узагальнені на основі численних випробувань, проведених протягом кількох років у понад 150 польових умовах. Остаточні форми цих рівнянь наведені в [72]:

$$C_T = (C_T)_{max} [1 - e^{-kS}] \quad (2.14)$$

$$TE = \frac{C_T(1 - s)}{C_T + C_R} \quad (2.15)$$

$$C_R = 0,049 + \frac{0,287}{MN} \quad (2.16)$$

$$(C_T)_{max} = 0,796 - \frac{0,92}{MN} \quad (2.17)$$

$$k(C_T)_{max} = 4,838 + 0,061 \cdot MN \quad (2.18)$$

Dwyer і Pearson [49], Dwyer та ін. [48], Gee-Clough [70-71], McAllister [108], Dwyer і Heigho [47], Dwyer [50], Gee-Clough [72] та Maclaurin [104] широко застосовували підхід із числом мобільності з прийнятною точністю. Однак прогнозована продуктивність була нижчою на полях з сухою, твердою поверхнею та вищою на полях із слизьким робочим шаром.

Brixius [31] розробив більш узагальнений вираз для тягових характеристик пневматичних шин із діагональним каркасом. Їхній підхід базується на модифікованому показнику мобільності:

$$\frac{T}{rW} = 0,88(1 - e^{-0,1MN_B})(1 - e^{-7,5S}) + 0,04 \quad (2.19)$$

$$\frac{R}{W} = \frac{1}{MN_B} + 0,04 + \frac{0,5S}{\sqrt{MN_B}} \quad (2.20)$$

Zoz [212] розробив шаблони для прогнозування продуктивності тракторів з приводом 2WD і 4WD, оснащених шинами з діагональним каркасом, на основі рівнянь 2.19–2.20. Al-Named та ін. [10], базуючись на пропозиціях Brixius, замінили у рівняннях 2.19 та 2.20 для радіальних шин значення 7,5 на 9,5, 0,04 на 0,032 і 1,0 на 0,9. Grisso та ін. [79] використали шаблони для визначення тягових характеристик тракторів з приводом 2WD та 4WD/MFWD, оснащених як діагональними, так і радіальними шинами. Zoz і Grisso [211] додатково розглянули використання електронних таблиць для прогнозування продуктивності тракторів або розрахунку необхідного баласту.

Self і Summers [165], а також Evans та ін. [56, 56] застосували рівняння Brixius для тракторів з приводом 4WD, проте вони підбирали константи, які найкраще відповідали експериментальним даним. Наприклад, Evans та ін. [56] використали наступний вираз для тяги:

$$\frac{T}{rW} = C_1(1 - e^{-C_2 MN_B})(1 - e^{-C_3 S}) + 0,04 \quad (2.21)$$

Де C_1 , C_2 і C_3 — константи, що пов'язані з характеристиками ґрунту, трактора та поверхні. Оскільки опір руху був незначним, для прогнозування опору руху вони використали рівняння Вгіхіус, які показали кращу ефективність для ґрунтових умов із значенням CI вище за 225 кПа.

Sharma і Pandey [157-158] також дійшли висновку, що моделі, розроблені Wismer і Gee-Clough, не можуть застосовуватись для піщано-глинистих суглинків.

$$GTR = \frac{T}{rW} = 0,36(1 - e^{-0,35 MN_{cc} \cdot S}) \quad (2.22)$$

де:

$$MN_{cc} = \frac{CI \cdot b \cdot d}{W_k} \left(\frac{\delta}{h} \right)^{0,5} \quad (2.23)$$

Усі розглянуті підходи мають свої переваги та недоліки, що накладають певні обмеження на їх застосування. В аналітичних методах існують труднощі з правильним визначенням граничних умов, що вимагає комплексного моделювання. Аналітичні моделі потребують фундаментальних інженерних властивостей ґрунту для встановлення залежності між напруженням та деформацією, а також визначення критерію текучості. методика для вимірювання цих фундаментальних властивостей ґрунту безпосередньо на місці. Напівемпіричні методи досить точно прогнозують роботу гусениць та жорстких коліс, проте потрібно вдосконалити застосування цих методів для прогнозування поведінки гнучких шин на деформованих поверхнях Емпіричні підходи довели свою ефективність у прогнозуванні тягових характеристик, більшість цих моделей на основі показника прохідності розроблені в США та європейських країнах. Проте, як зазначає Wong [195], діапазон застосовуваності цих параметрів обмежений випадками, схожими на ті, на основі яких були розроблені відповідні рівняння. Це підтверджується результатами досліджень різних авторів, які підбирали константи у емпіричних рівняннях методом апроксимації для підвищення точності прогнозу.

2.2 Математична модель руху автомобіля бездоріжжям

Беручи до уваги виявлені особливості аналітичних, напівемпіричних та емпіричних підходів, а також обмеження їх застосування для опису взаємодії гнучких шин із деформованими ОП, доцільним є вибір імітаційного моделювання як основного інструменту дослідження. За цих умов побудова імітаційної моделі на основі емпіричних рівнянь методики WES є найбільш раціональною, оскільки такі залежності не потребують детального визначення повного комплексу фізико-механічних властивостей ґрунту та складних граничних умов, що в реальних умовах експлуатації часто є невизначеними або змінними. Загалом робота моделі побудована на відомих з теорії руху автомобіля рівняннях тягового балансу схема якого наведена на рисунку 2.1.

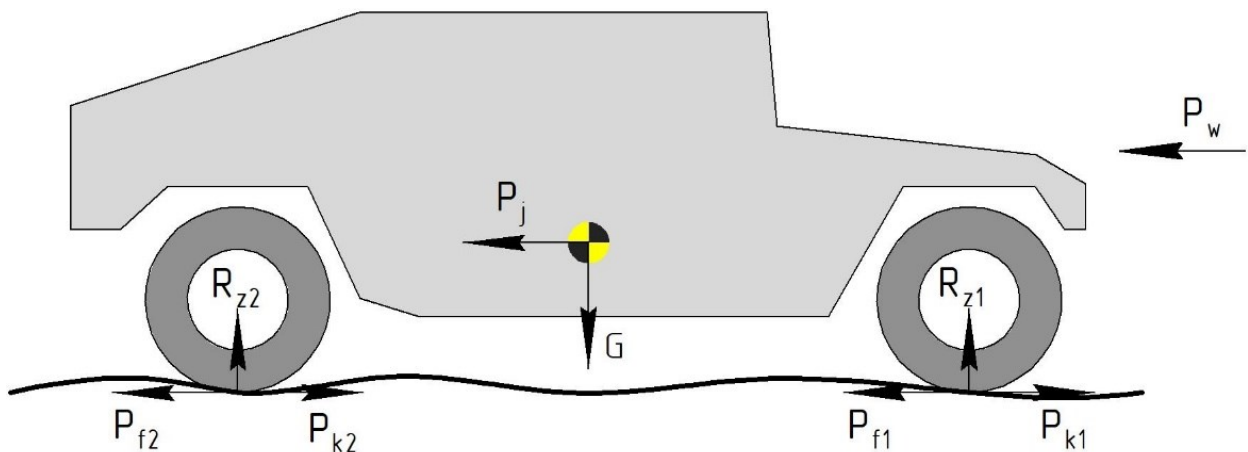


Рисунок 2.1 - Схема сил, що діють на автомобіль при русі бездоріжжям

$$\sum_{i=1}^m P_k \geq \sum_{i=1}^m P_f + P_j + P_w \quad (2.24)$$

$$\sum_{i=1}^m P_\varphi \geq \sum_{i=1}^m P_f + P_j + P_w$$

де P_k – сумарне тягове зусилля, P_φ – сумарне тягове зусилля з умов зчеплення з ОП, P_f – сумарний опір ґрунту, P_j – сила опору розгону, P_w – аеродинамічний опір, що визначається за відомими формулами:

$$P_k = \frac{T_k}{r_k} \quad (2.25)$$

$$P_\varphi = R_z \cdot \varphi \quad (2.26)$$

$$P_f = R_{zi} \cdot f \quad (2.27)$$

$$P_j = \delta M v \quad (2.28)$$

$$P_w = c_x \cdot \rho \frac{v^2}{2} F \quad (2.29)$$

Проте недоліком пропонованих емпіричних методів оцінки показників прохідності КТЗ, є те що значення відношення δ / h яке залежить передусім від жорсткості каркасу шини та тиску в повітря в ній, з метою спрощення приймають:

- $\delta / h = 0,18$ — при номінальному тиску (для забезпечення номінальної швидкості при номінальному навантаженні);
- $\delta / h = 0,25$ — при зниженому тиску (для руху поза дорогою з обмеженою швидкістю), приблизно 70% від номінального тиску;
- $\delta / h = 0,35$ — при ще більш зниженому тиску (для подолання складних ділянок), близько 30% від номінального тиску.

Таке спрощення формує слабкий відгук моделі на регулювання тиску повітря в шині, та не дозволяє оцінити його вплив на прохідність бездоріжжям. Відповідно до завдань дослідження та пропонованого методу підвищення прохідності було удосконалено методику MN з точки зору регулювання тиску, а саме, введено додаткові вирази для визначення радіальної деформації шини та площі плями контакту. Модифікація покращить відгук розробленої в подальшому імітаційної моделі на роздільне регулювання тиску в шинах, що сприяло більш точному розрахунку параметрів взаємодії колеса з ОП. Також пропонується доповнити модель розрахунком глибини колії z за наступним виразом отриманим в процесі аналізу досліджень застосування емпіричних методів:

$$z = 0,003 + \frac{0,910}{MN} \quad (2.30)$$

Поведінка шини при різних тисках є мало дослідженою [107, 119, 128-129, 138, 141, 176-177, 179) після аналізу останніх публікацій слід констатувати

існування декількох математичних моделей для визначення радіальної деформації шини і плями контакту, що враховують вертикальне навантаження та тиск повітря. Стосовно деформації найбільшого поширення набули наступні вирази:

$$\delta = 0,109 \times \frac{W_t^{0,85}}{b^{0,7} d^{0,43} p^{0,6}} \times (0,015 \times b + 0,42) \quad (2.31)$$

$$\delta = 0,02 + 0,006 \times W - 1,35 \times 10^{-5} \times W \times P_i \quad (2.32)$$

$$\delta = 0,67 \times h \times \left[\frac{P_g}{W} \times (d \times b) \right]^{-0,8} \quad (2.33)$$

$$\delta = 1,052 \times h \times \left[\frac{P_g}{W} \times (d \times b) \right]^{-1,01} \quad (2.34)$$

$$\delta = 1,1443 \times h \times \left[\frac{P_g}{W} \times (d \times b) \right]^{-1,07} \quad (2.35)$$

Щодо площі плями контакту варто відзначити наступні залежності:

$$A = 0,166 \times TS + 3,6 \times 10^{-3} \times W - 15,6 \times 10^{-5} \times P_i \quad (2.36)$$

$$A = 0,31 \times W^{0,7} \times \sqrt{\frac{b}{d}} \times P_i^{-0,45} \quad (2.37)$$

$$A = 0,367 \times W^{0,554} \times \sqrt{\frac{b}{d}} \times P_i^{-0,42} \quad (2.37)$$

$$A = 0,27 \times W^{0,84} \times \sqrt{\frac{b}{d}} \times P_i^{-0,5} \quad (2.39)$$

У роботі [203] проведено порівняльний аналіз точності пропонованих вище виразів рисунок 2.2 та рисунок 2.3. Розглянувши графіки можна стверджувати, що найточнішими є вирази 2.32 та 2.37, тому при моделюванні шин було прийняте рішення послуговуватися саме цими двома виразами.

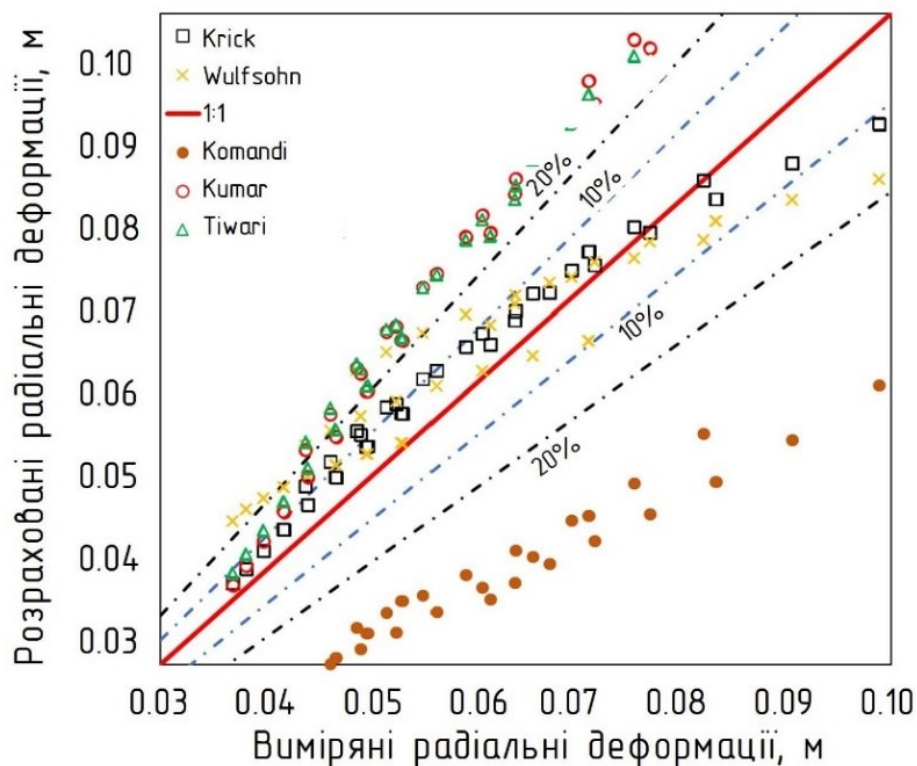


Рисунок 2.2 - Порівняння вимірної та розрахованої радіальної деформації

[203]

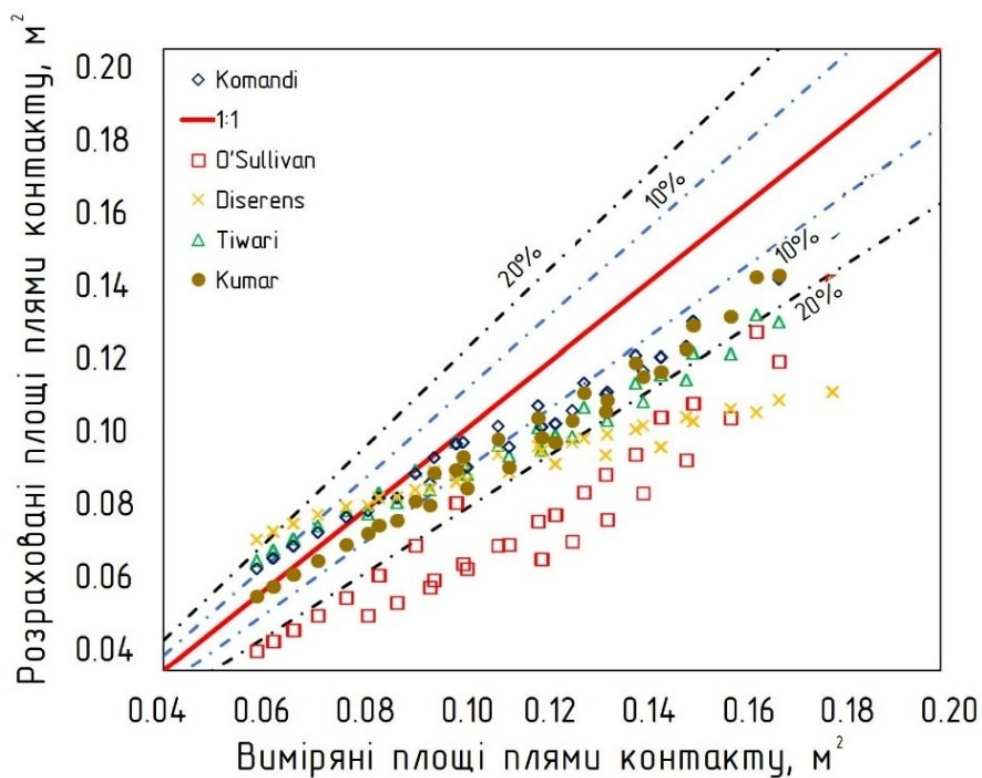


Рисунок 2.3 - Порівняння вимірної та розрахованої площі контакту шини з

ОП [203]

2.3 Структура імітаційного моделювання руху у програмному середовищі MATLAB Simulink

Імітаційну модель руху повноприводного КТЗ бездоріжжям реалізовано в програмному середовищі MATLAB Simulink [228-230, 237-238, 249, 255] з використанням стандартних блоків та модулів. Перевагою даного методу є можливість досліджувати складні динамічні системи на основі емпіричних та фізичних моделей, зменшуючи кількість натурних експериментів. Середовище MATLAB Simulink дозволяє створювати математичні та імітаційні моделі у вигляді блок-схем без необхідності безпосереднього програмування диференціальних рівнянь. Модель формується з функціональних блоків, які описують фізичні та логічні процеси, після чого система досліджується в режимі реального часу.

В основу імітаційної моделі руху автомобіля бездоріжжям і подальшого визначення показників цього руху (показників опорно-зчіпної прохідності) покладено моделювання автомобіля запропоноване в роботах. В моделі прийнято наступні обмеження і припущення:

- розглядається тільки прямолінійних рух по горизонтальній ділянці ОП;
- умови руху для коліс правого та лівого борту автомобіля є ідентичними;
- зміна характеристик ґрунту після проходження кожної осі задається коефіцієнтом ущільнення;
- колії утворені після проходу усіх осей автомобіля повністю співпадають;
- реакція двигуна на зміну положення педалі газу - миттєва, характеристики двигуна взяті з ЗШХ, що представлена заводом виробником;
- крутний момент двигуна передається на колесо без врахування пружно-демпфуючих властивостей складових трансмісії

Алгоритм роботи розробленої імітаційної моделі зображено на рисунку 2.4.

Для спрощення взаємодії з моделлю та кращого сприйняття результатів моделювання, було розроблено користувацький інтерфейс у вигляді панелі приборів (рисунок 2.5).

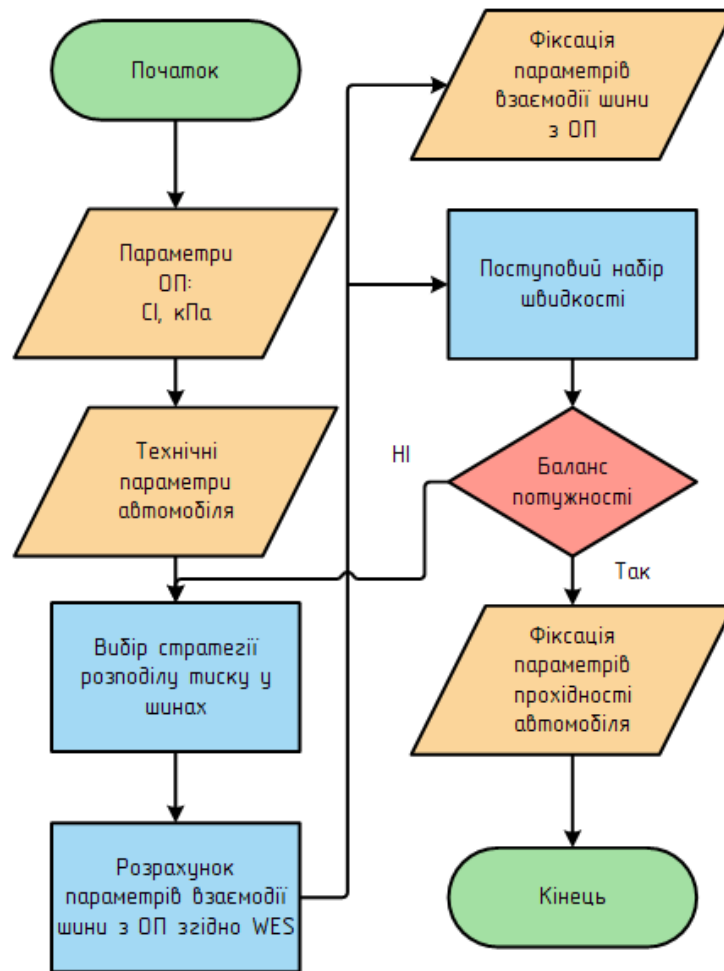


Рисунок 2.4 - Алгоритм роботи моделі руху бездоріжжям повноприводного автомобіля

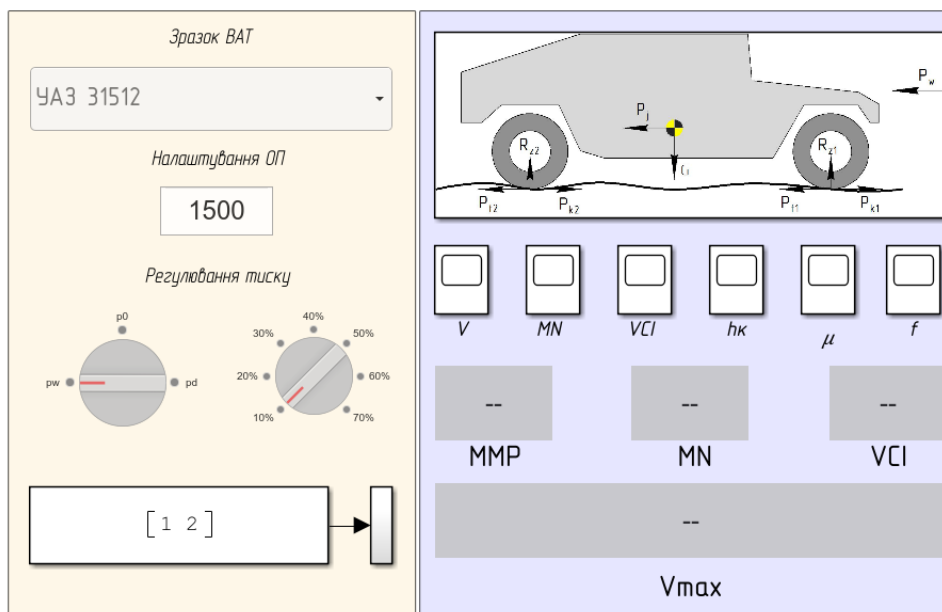


Рисунок 2.5 - Інтерфейс моделі руху бездоріжжям повноприводного автомобіля

Структура моделі являє собою шість окремих модулів розділених за функціональністю та послідовністю роботи (рисунок 2.6).

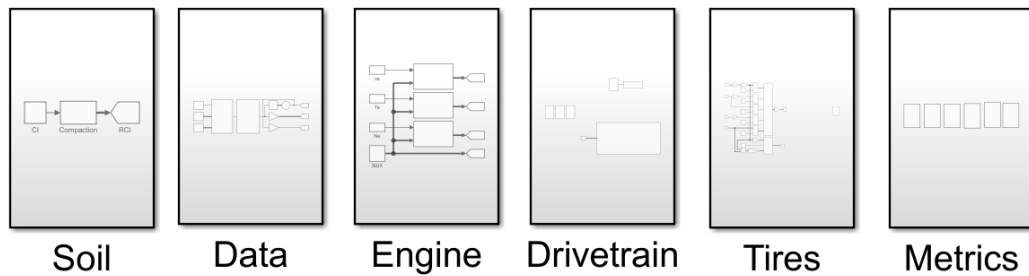


Рисунок 2.6 - Структура моделі руху бездоріжжям повноприводного автомобіля

Модуль "Soil» (рисунок 2.7) призначений для розрахунку значення Rating Cone Index (RCI) для кожної осі транспортного засобу на основі базового значення Cone Index (CI) з урахуванням зміни властивостей ОП після проходження попередніх осей. Під час руху багатовісного транспортного засобу перша вісь здійснює первинне ущільнення ґрунту, внаслідок чого несуча здатність ОП для наступних осей зростає. Це явище враховується шляхом введення коригувальних коефіцієнтів до базового CI, таким чином, для кожної наступної осі використовується збільшене ефективне значення індексу ґрунту. Блок здійснює вибір відповідного значення залежно від колісної схеми. Обране значення передається на вихід підсистеми як поточний RCI для розрахунку взаємодії конкретної осі з ОП.

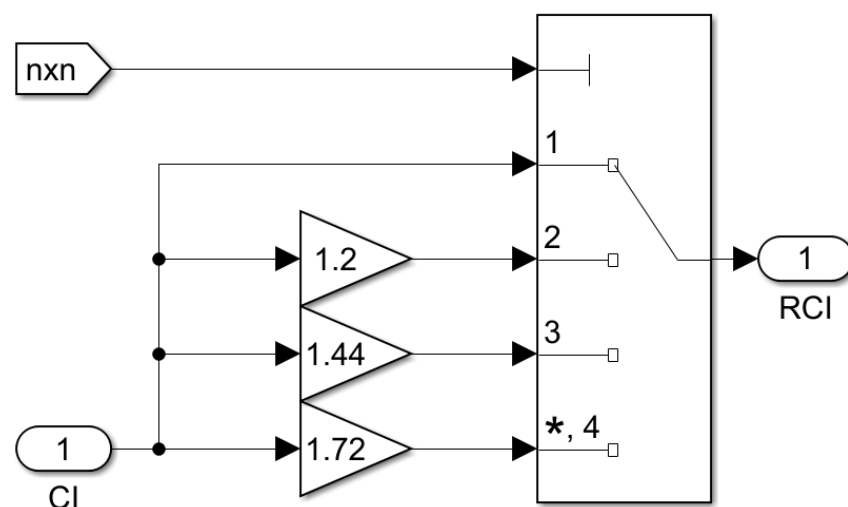


Рисунок 2.7 - Модуль формування фізико-механічних характеристик ОП

Модуль «Data» (рисунок 2.8) призначений для формування повного набору параметрів транспортного засобу, необхідних для моделювання динаміки руху, взаємодії рушіїв з ОП та оцінювання показників прохідності. Підсистема виконує функцію централізованого джерела технічних даних моделі. На вхід підсистеми подається ідентифікатор транспортного засобу та масив довідкових параметрів, що містить структуровані технічні характеристики транспортних засобів. У моделі відтворено десять типових повноприводних автомобілів, характерних для експлуатаційного парку України. Набір параметрів сформовано таким чином, щоб охопити основні класи машин за вантажопідйомністю, колісними формулами та конструктивними особливостями.

За допомогою блоку 2-D Lookup Table здійснюється вибір відповідного набору характеристик залежно від обраного транспортного засобу, що дозволяє використовувати єдину математичну модель для дослідження різних автомобілів без зміни її структури. На виході формується вектор параметрів, що містить повний опис вибраної конфігурації.

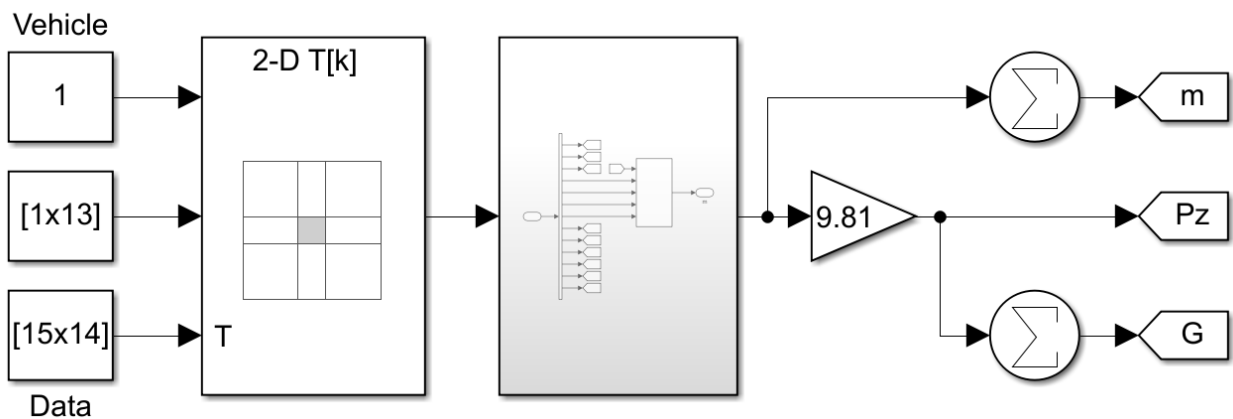


Рисунок 2.8 - Модуль задання технічних характеристик

У модулі визначаються та передаються до інших підсистем такі параметри:

1. Масово-навантажувальні характеристики: повна маса транспортного засобу, розподіл навантаження по осях;
2. Колісна схема: колісна формула та кількість коліс на кожній осі;
3. Геометричні параметри шин: радіус кочення, ширина та висота профілю, мінімальний та максимальний робочі тиски повітря;

5. Параметри трансмісії: передавальні числа КПП та головної передачі, характеристики силового приводу;
6. Аеродинамічні характеристики: коефіцієнт аеродинамічного опору; ефективна лобова площа.

Модуль «Engine» (рисунок 2.9) призначений для моделювання тягових характеристик силової установки на основі зовнішньої швидкісної характеристики двигуна. Реалізація виконана із застосуванням табличного представлення параметрів двигуна та їх інтерполяції під час роботи моделі. В основі модуля використано набір блоків Lookup Table, які здійснюють вибірку значень із масиву даних зовнішньої швидкісної характеристики. Даний масив містить паспортні залежності основних параметрів двигуна від частоти обертання колінчастого вала. Вхідним параметром модуля є частота обертання двигуна, за якою визначаються ефективний крутний момент та потужність двигуна.

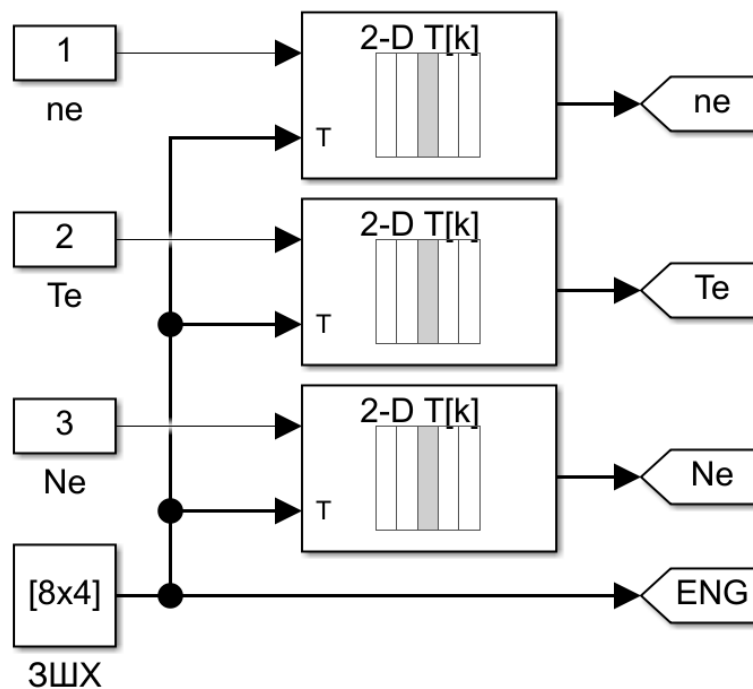


Рисунок 2.9 - Модуль задання зовнішньої швидкісної характеристики двигуна

Lookup-блоки виконують інтерполяцію між вузловими точками характеристики, що забезпечує безперервність зміни параметрів та коректне відтворення роботи двигуна в усьому робочому діапазоні обертів. Результати роботи модуля передаються до підсистем трансмісії та динаміки руху

транспортного засобу для подальшого розрахунку тягового зусилля, швидкості руху та енергетичних показників. Основні переваги підходу є: використання реальної зовнішньої швидкісної характеристики двигуна, коректне відтворення нелінійності тягових властивостей, універсальність (заміна типу двигуна виконується зміною вхідного масиву) та стабільність моделювання завдяки табличній інтерполяції.

Модуль «Drivetrain», що зображений на рисунку 2.10 призначений для визначення режиму роботи силового агрегату та вибору оптимальної передачі залежно від необхідного тягового моменту на ведучих колесах транспортного засобу. Логіка роботи модуля побудована на зворотному перерахунку моментів від колеса до двигуна.

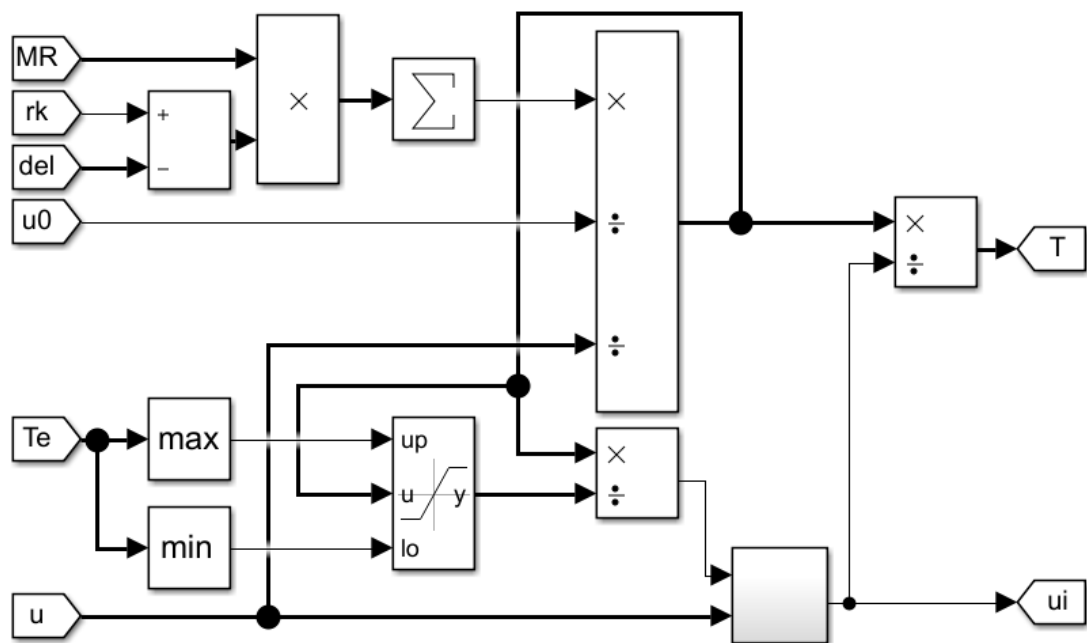


Рисунок 2.10 - Модуль визначення режиму роботи силового агрегату та вибору передачі

На першому етапі формується необхідний крутний момент на ведучому колесі, який забезпечує задані умови руху автомобіля (подолання опорів руху, прискорення, спротиву повітря). Момент на колесі приводиться до вихідного вала коробки передач з урахуванням передаточного числа головної передачі та радіусу кочення колеса. Для всіх доступних передач виконується визначення необхідного

моменту на валу двигуна та формується масив необхідних моментів двигуна для кожної передачі. Отримані значення крутного моменту порівнюються із зовнішньою швидкісною характеристикою двигуна на можливість реалізації необхідного моменту у допустимому діапазоні обертів. Із передач, що задовольняють умову забезпечення необхідного моменту, обирається та, що відповідає найбільшій швидкості. Після вибору передачі визначаються оберти двигуна, при яких за зовнішньою швидкісною характеристикою створюється необхідний крутний момент. Модуль трансмісії забезпечує зв'язок між динамікою руху автомобіля та характеристиками двигуна, формуючи оптимальний режим роботи силового агрегату в кожний момент часу моделювання.

Модуль «Tire» (див. рисунок 2.11) призначений для визначення параметрів взаємодії колеса з ОП шляхом розрахунку деформації шини та площі плями контакту залежно від експлуатаційних і конструктивних параметрів. Модуль забезпечує перехід від навантажувальних параметрів транспортного засобу до характеристик контакту шини з ґрунтом, або дорожнім покриттям, які надалі використовуються при розрахунку опору коченню, тягових властивостей і показників прохідності. У розрахунку враховуються: вертикальне навантаження на кожен вісь; тиск повітря в шині (з модуля регулювання тиску); геометричні параметри шин, зокрема: зовнішній діаметр; ширина профілю; статичний радіус; Розрахунок виконується окремо для кожної осі, що дозволяє враховувати нерівномірний розподіл навантаження та різні режими регулювання тиску. Деформація визначається як функція вертикального навантаження та внутрішнього тиску в шині. При зменшенні тиску або збільшенні навантаження величина деформації зростає. На основі отриманої деформації коригується робочий радіус колеса, що впливає на кінематичний зв'язок між обертами колеса та швидкістю руху. Площа контакту визначається з урахуванням рівноваги між вертикальним навантаженням та внутрішнім тиском у шині, а також геометрії профілю шини. Зі зменшенням тиску площа контакту збільшується, що підвищує несучу здатність на слабких ґрунтах. Геометричні параметри визначають форму плями контакту (довжину та ширину), що впливає на подальші розрахунки взаємодії з ОП. Модуль

шини забезпечує фізично обґрунтоване визначення параметрів контакту колеса з ОП та є ключовим елементом моделювання мобільності та прохідності транспортного засобу.

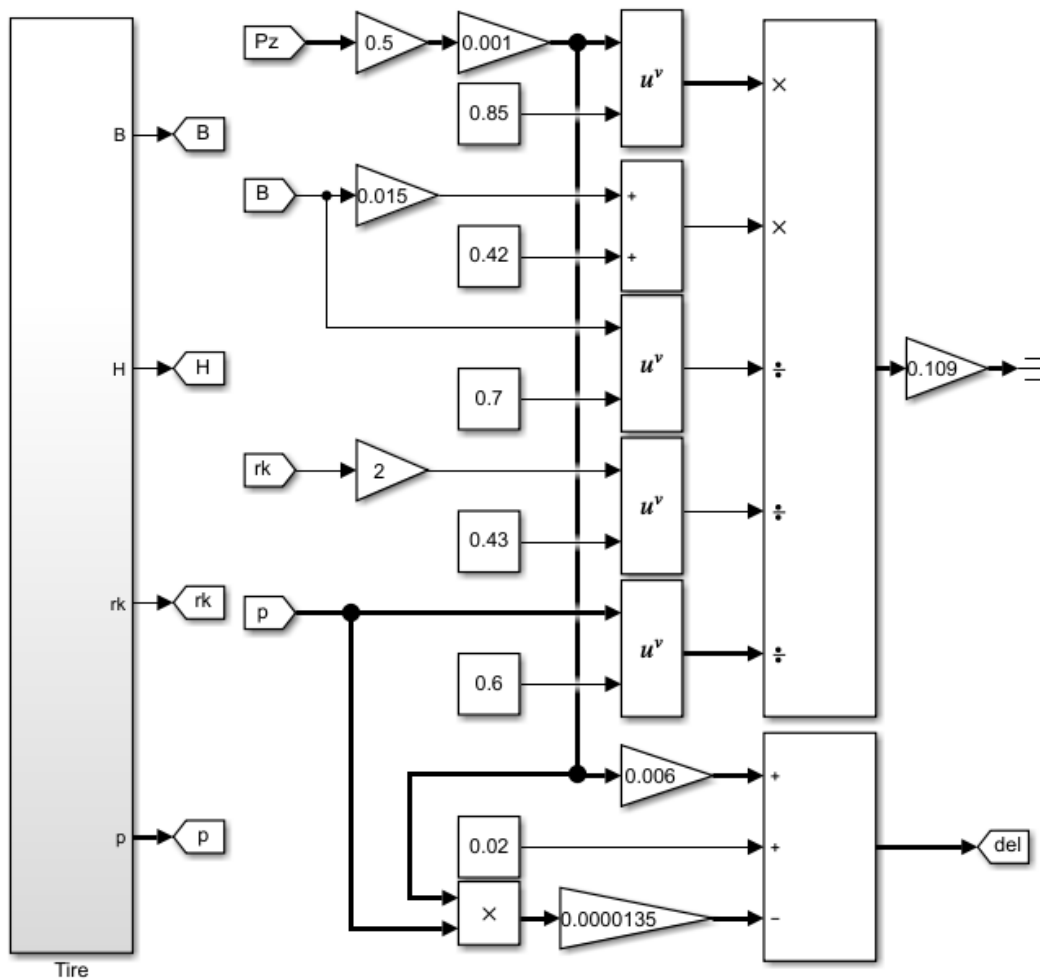


Рисунок 2.11 - Модуль задання характеристик та розрахунку радіальної деформації шин

Підсистема регулювання тиску (рисунок 2.12), що входить в модуль «Tire» призначена для формування значень тиску повітря в шинах транспортного засобу відповідно до обраного режиму керування системою централізованого (СТІС), або роздільного (ІТРС) регулювання тиску. Керування режимом роботи здійснюється за допомогою керуючого сигналу, який дозволяє перемикатися між трьома режимами регулювання:

- Максимальний тиск. Для всіх осей встановлюється однакове значення максимального допустимого тиску в шинах. Режим використовується для руху по дорогах із твердим покриттям.
- Мінімальний тиск. На всі осі подається мінімальне значення тиску, що забезпечує підвищення плями контакту та покращення прохідності на слабких ґрунтах.
- Роздільне регулювання по осях. Тиск формується індивідуально для кожної осі з урахуванням заданого градієнта зміни тиску вздовж автомобіля.

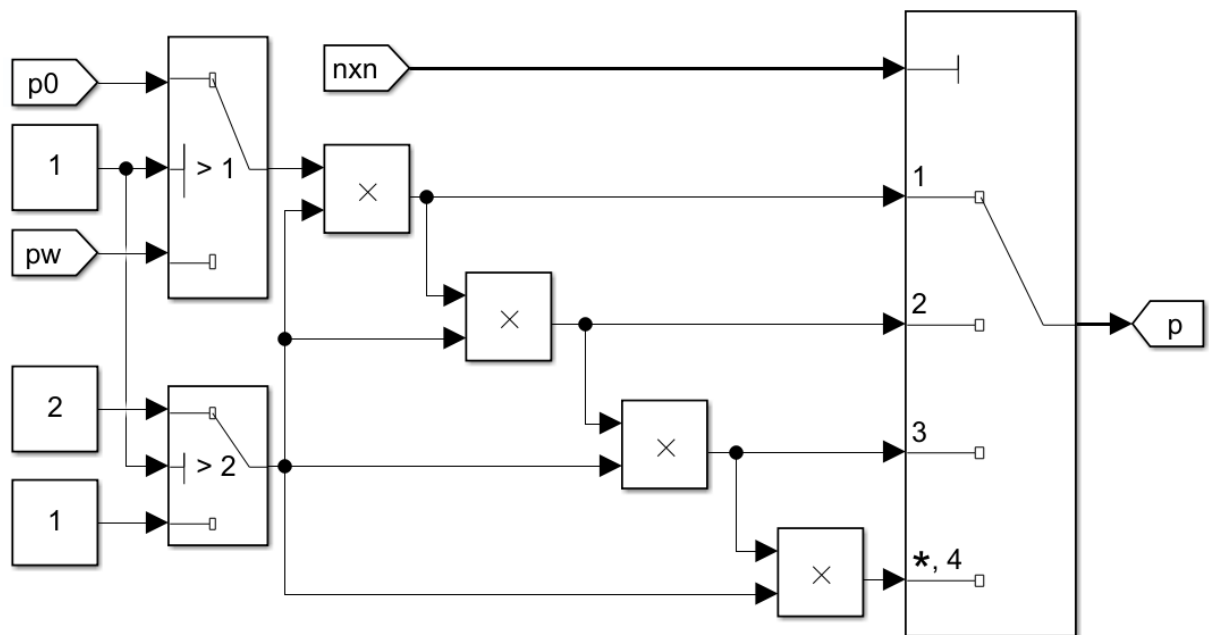


Рисунок 2.12 - Модуль вибору стратегії регулювання тиску повітря в шинах

У режимі роздільного керування користувач задає відсотковий перепад тиску між сусідніми осями. Розрахунок виконується за такими принципами: базове значення тиску задається для першої осі; для кожної наступної осі тиск збільшується на заданий відсоток; зміна тиску має монотонний характер; максимальне значення досягається на останній осі транспортного засобу. Особливості реалізації підтримка багатовісних транспортних засобів; можливість оперативної зміни режиму під час моделювання; параметричне задання градієнта тиску; автоматичне формування зростання тиску в напрямку задніх осей.

Модуль «Metrics» призначений для визначення показників прохідності MN, VCI та MMP за методиками WES та RADRE відповідно (рисунок 2.13 та 2.14).

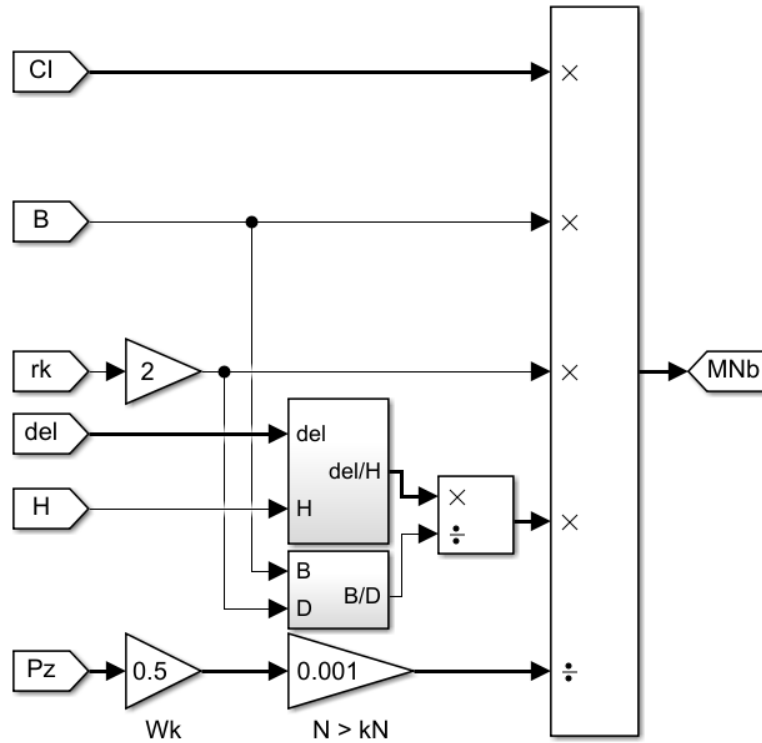


Рисунок 2.13 - Модуль розрахунку показника прохідності MN_b згідно методики ASAE D497.4

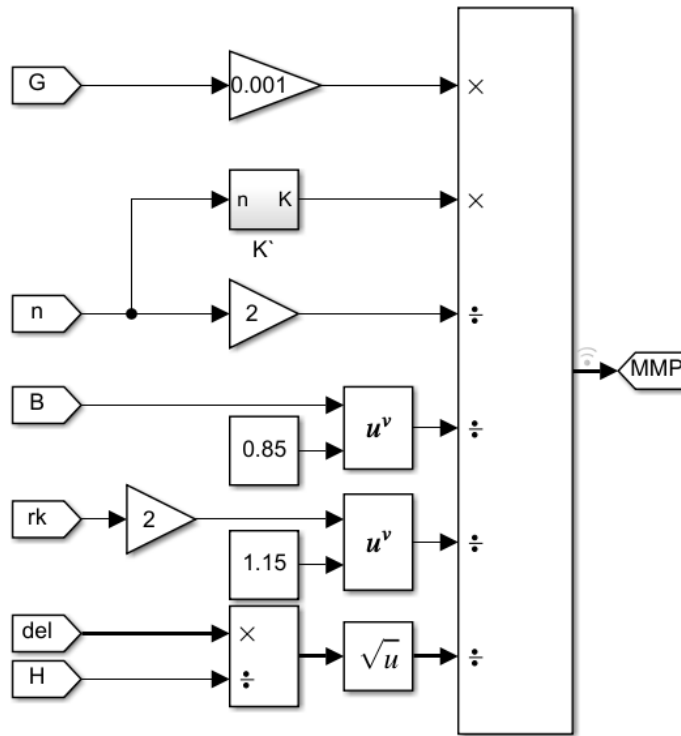


Рисунок 2.14 - Модуль розрахунку показника прохідності MMP згідно методики RADRE

2.4 Висновки за розділом

Виконано обґрунтування і розробку імітаційної моделі руху повноприводного автомобіля бездоріжжям із урахуванням взаємодії систем «двигун – трансмісія – шина – ОП». Встановлено, що складність процесів, які визначають прохідність транспортних засобів, зумовлена суттєвою нелінійністю зв'язків між параметрами силового агрегату, трансмісії, характеристиками шин, тиском у них та фізико-механічними властивостями ґрунту. Це унеможливило отримання універсальних аналітичних рішень у замкненому вигляді та обґрунтує застосування імітаційного підходу як основного інструменту дослідження.

Проведено систематизацію існуючих підходів до моделювання взаємодії шини з деформованою ОП, які умовно поділено на аналітичні, напівемпіричні та емпіричні. Показано, що аналітичні моделі забезпечують глибоке фізичне розуміння процесів контакту, однак вимагають значного обсягу вхідних даних і складного визначення граничних умов, що обмежує їх практичне застосування. Напівемпіричні моделі, зокрема підходи Bekker та Wong, дозволяють достатньо ефективно описувати взаємодію колеса з ґрунтом, однак їх точність суттєво залежить від коректності визначення параметрів ґрунту та умов їх отримання. Емпіричні моделі, включаючи методики WES, Wismer–Luth, Brixius та їх модифікації, є зручними для інженерних розрахунків, проте мають обмежену область застосування, оскільки базуються на експериментальних даних, отриманих для конкретних типів ґрунтів та умов руху.

Встановлено, що інтегральні показники прохідності, зокрема мобільні індекси MN, VCI та MMP, є ефективним інструментом узагальненої оцінки здатності транспортного засобу до руху в умовах бездоріжжя. Разом з тим, існуючі підходи недостатньо чутливо реагують на зміну внутрішнього тиску в шинах, що обмежує можливість адекватної оцінки ефективності систем централізованого та роздільного регулювання тиску.

Показано, що спрощені залежності для визначення радіальної деформації шини та площі плями контакту не забезпечують достатньої точності при зміні

експлуатаційних режимів, зокрема при зниженні тиску в шинах. У зв'язку з цим, удосконалено математичний опис контактної взаємодії шини з ОП шляхом уточнення залежностей деформації, площі контакту та глибини колії, що дозволило підвищити чутливість моделі до зміни параметрів системи регулювання тиску.

Розроблено структурну імітаційну модель у середовищі MATLAB Simulink, яка реалізує модульний підхід та включає підсистеми двигуна, трансмісії, шин, ОП, регулювання тиску та розрахунку показників прохідності. Така структура забезпечує можливість адаптації моделі до різних типів транспортних засобів, варіацій колісних формул та режимів руху без зміни загальної архітектури.

Запропонована модель дозволяє проводити чисельні експерименти з оцінювання тягово-зчіпних властивостей та показників прохідності в різних ґрунтових умовах, а також аналізувати вплив роздільного регулювання тиску в шинах на енергетичні витрати та опір руху. Отримані результати створюють основу для подальшого вдосконалення методів підвищення прохідності повноприводних транспортних засобів і можуть бути використані при проектуванні систем регулювання тиску та оптимізації конструктивних параметрів автомобілів підвищеної прохідності.

РОЗДІЛ III. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ І ОЦІНКА ВПЛИВУ РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ У ШИНАХ НА ПРОХІДНІСТЬ БЕЗДОРІЖЖЯМ

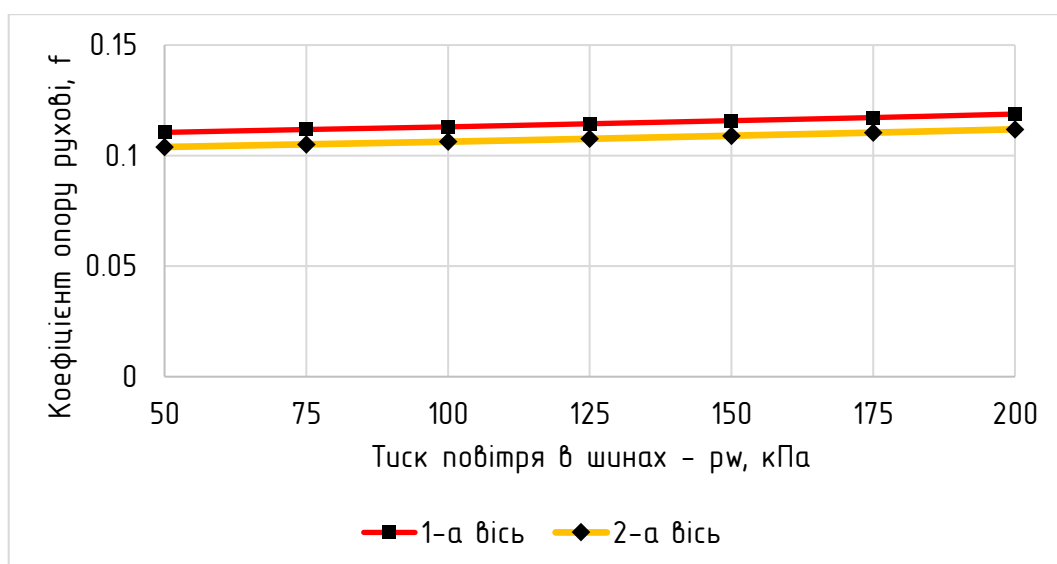
3.1 Оцінка впливу регулювання тиску повітря в шинах на рух автомобіля бездоріжжям

У межах дослідження виконано оцінку впливу конструктивних параметрів автомобіля та режимів регулювання тиску в шинах на показники руху бездоріжжям ґрунтах. Аналіз проведено для автомобілів із колісними схемами у широкому діапазоні повних мас. В якості базових повноприводних КТЗ вибрано УАЗ-469, КамАЗ-4310, КрАЗ-5233, КрАЗ-6322 та БТР-4 [229, 249], що аргументовано їхньою поширеністю та доступом до усіх необхідних технічних характеристик. Короткі технічні характеристики досліджуваних зразків колісної автомобільної техніки представлені в таблиці 3.1

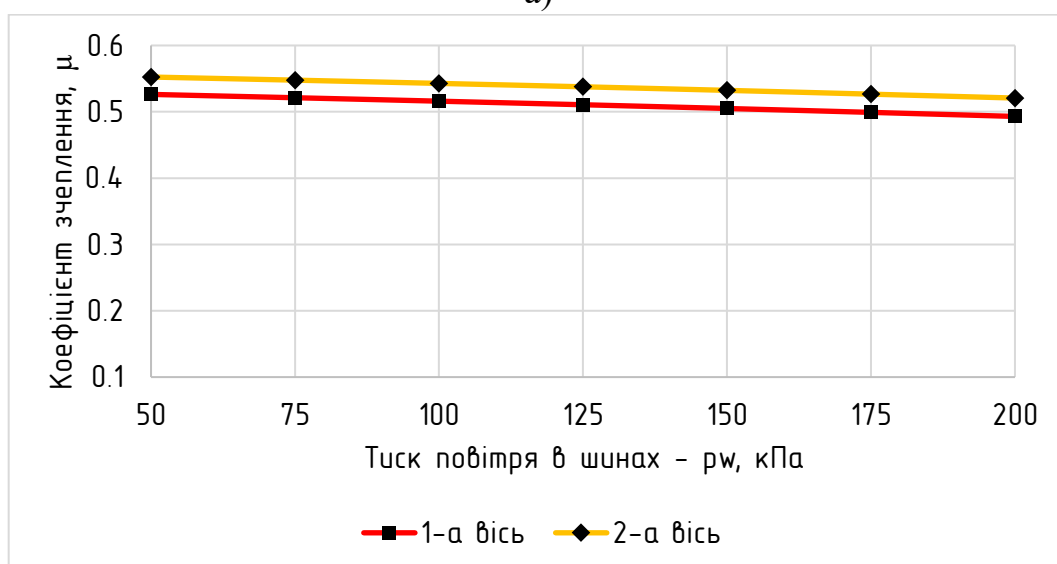
Таблиця 3.1 - Короткі технічні характеристики досліджуваних автомобілів

№ з/п	Модель автомобіля	Колісна формула	Маса, кг	Розподіл маси по осях		Питома потужність, кВт/т	Кліренс, мм	Шини
				Передня, кг	Задня, кг			
1	УАЗ-469	4x4	2105	1004	1101	26,26	300	235/75R15
2	КамАЗ-4310	6x6	8745	4315	4430	15,58	390	425/85R20
3	КрАЗ-5233	4x4	10700	6000	4700	12,93	370	530/70R21
4	КрАЗ-6322	6x6	23000	7000	16000	10,56	370	530/70R21
5	БТР-4	8x8	22000	11000	11000	16,72	460	365/80R20

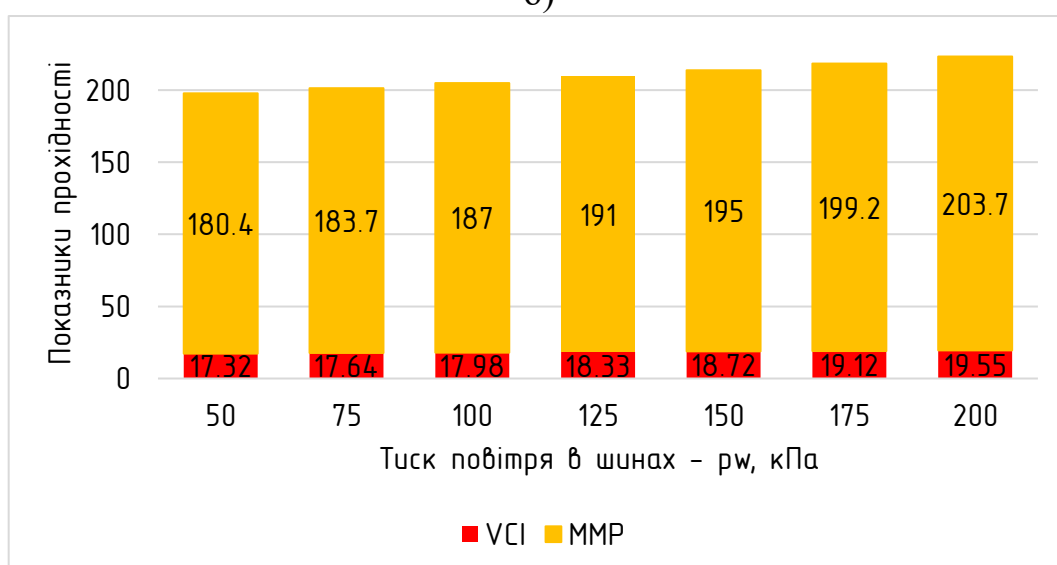
Розрахунки виконано з урахуванням розподілу навантаження по осях, зміни тиску в шинах кожної осі окремо та впливу ущільнення ґрунту, яке враховано введенням відповідних коефіцієнтів ущільнення. Для кожного режиму визначено коефіцієнти опору руху, коефіцієнти зчеплення, а також інтегральні показники прохідності VCI та MMP (рисунки 3.1 – 3.5).



а)

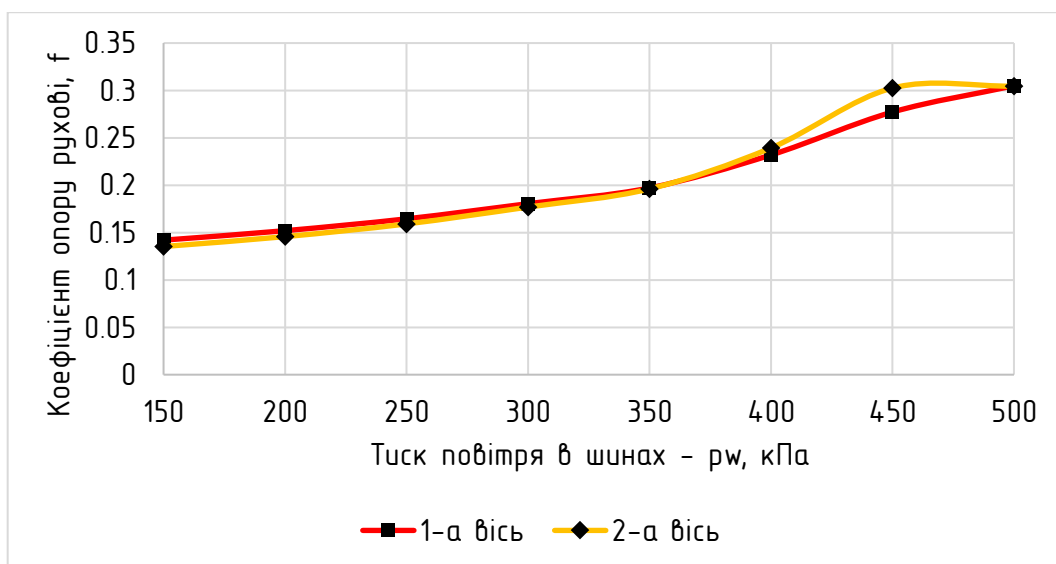


б)

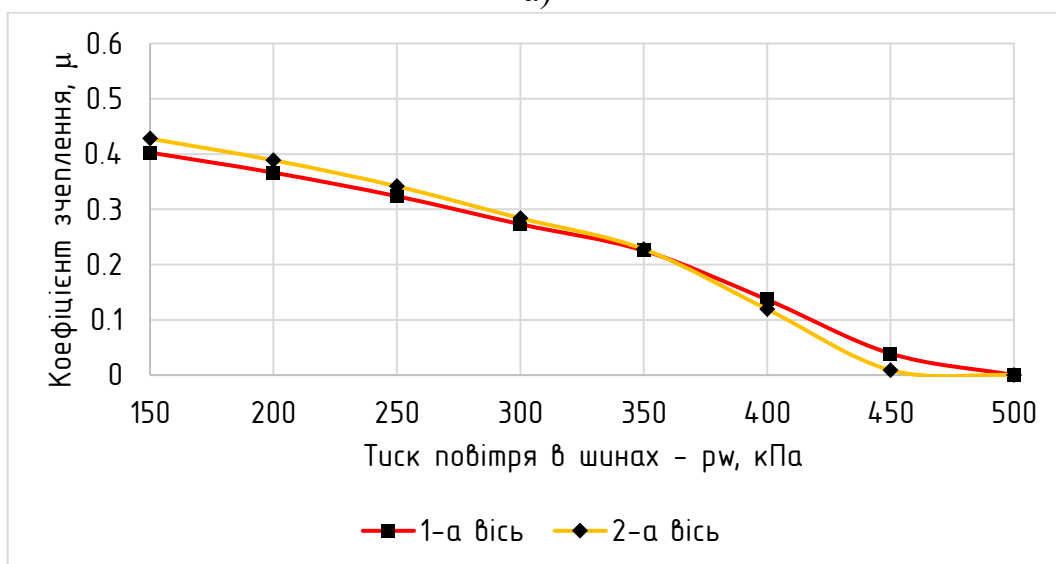


в)

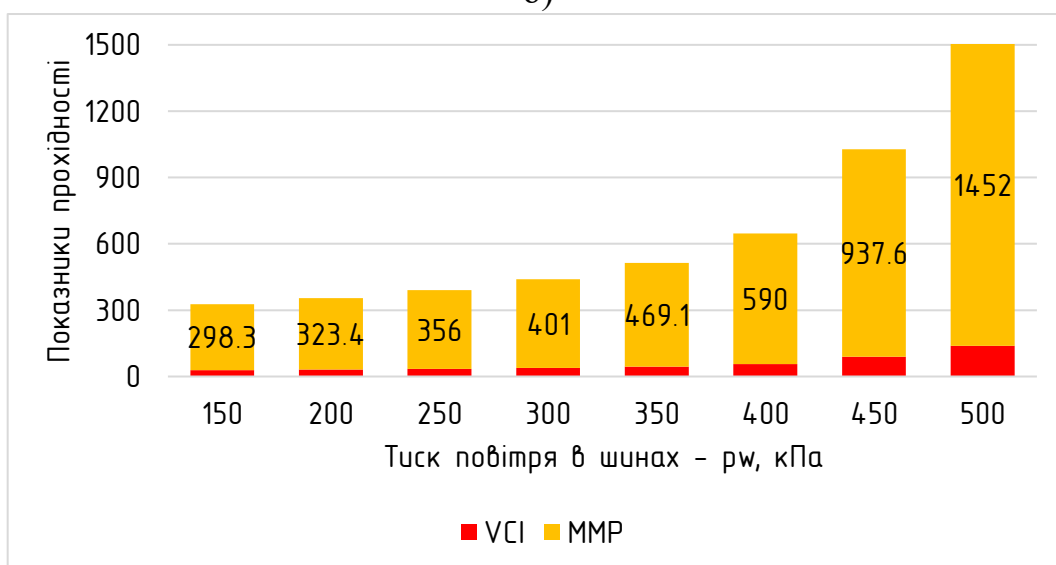
Рисунок 3.1 - Залежність коефіцієнтів опору руху а) та зчеплення б) та показників прохідності в) від тиску повітря в шинах для автомобіля УАЗ-469



а)

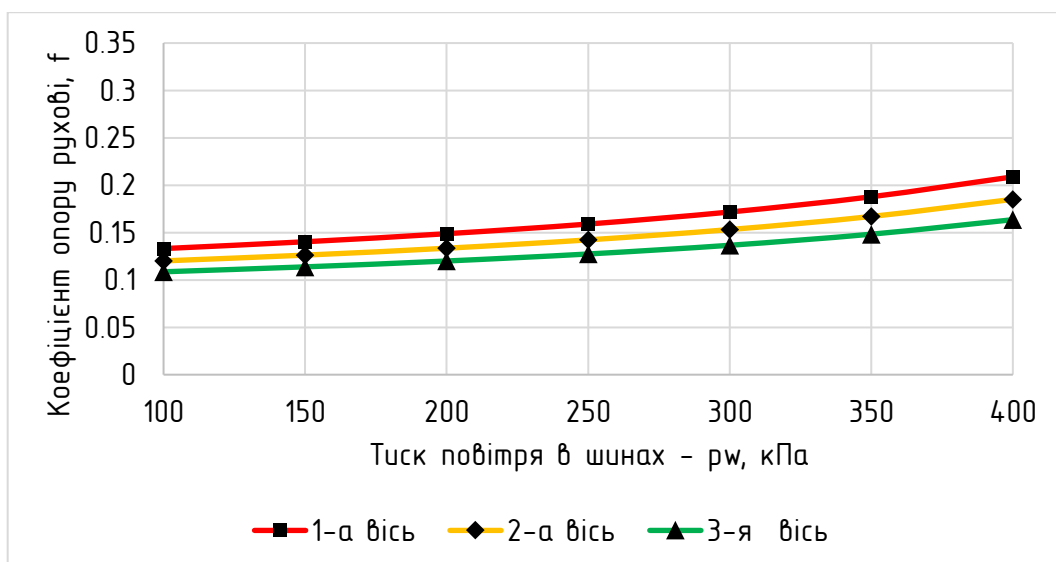


б)

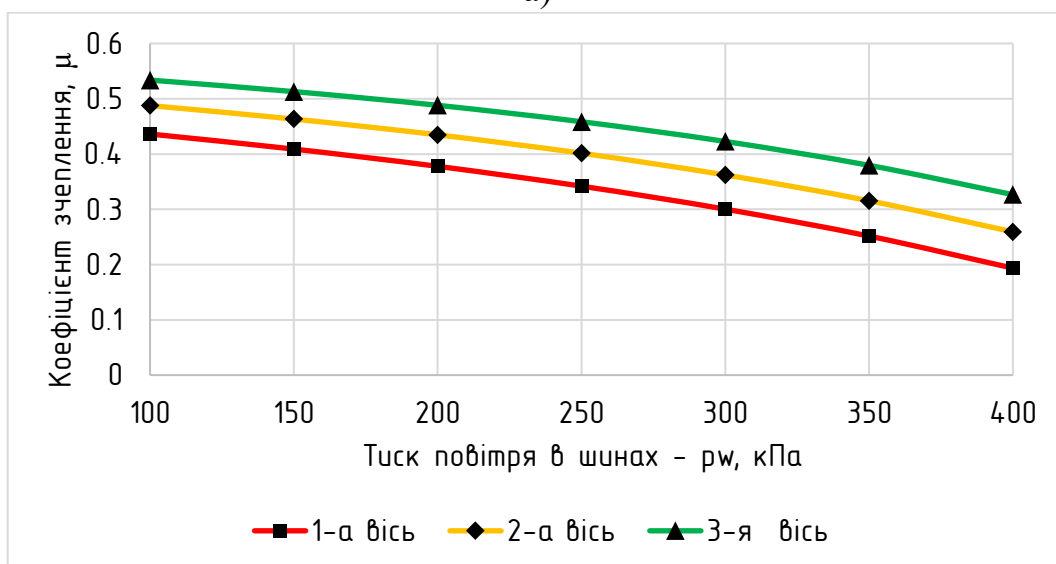


в)

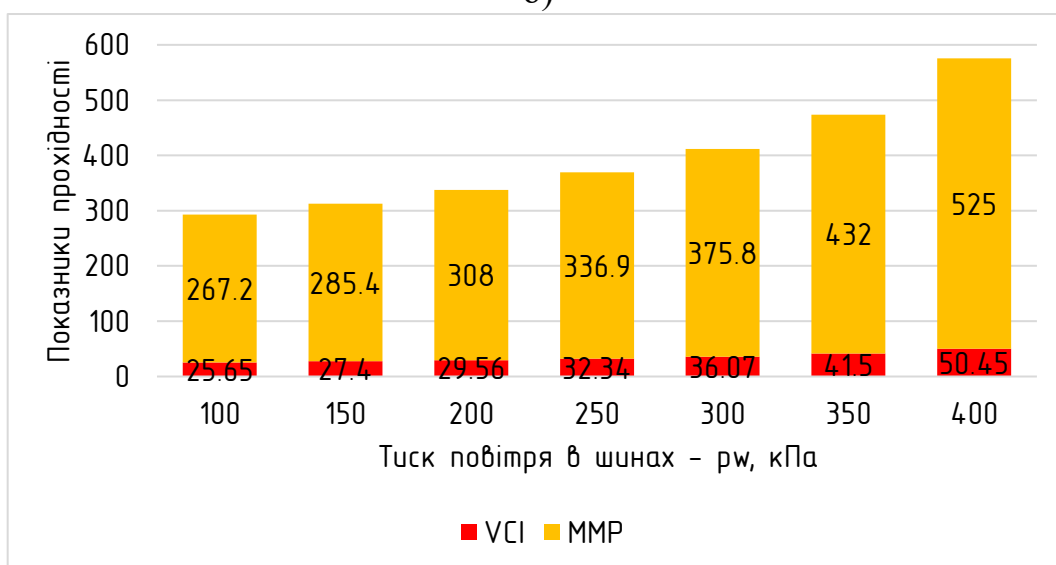
Рисунок 3.2 - Залежність коефіцієнтів опору руху а) та зчеплення б) та показників прохідності в) від тиску повітря в шинах для автомобіля КрАЗ-5233



а)

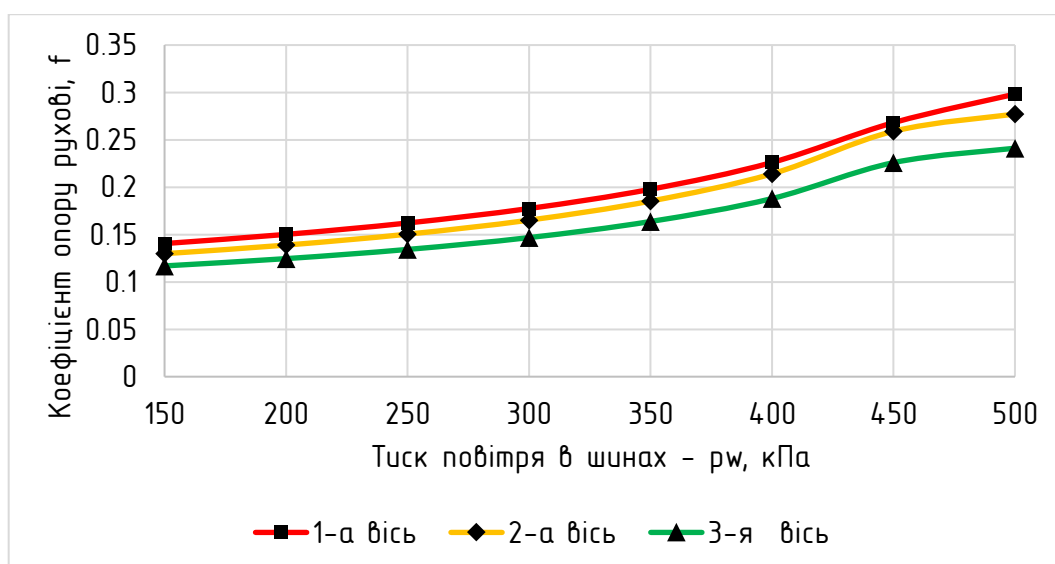


б)

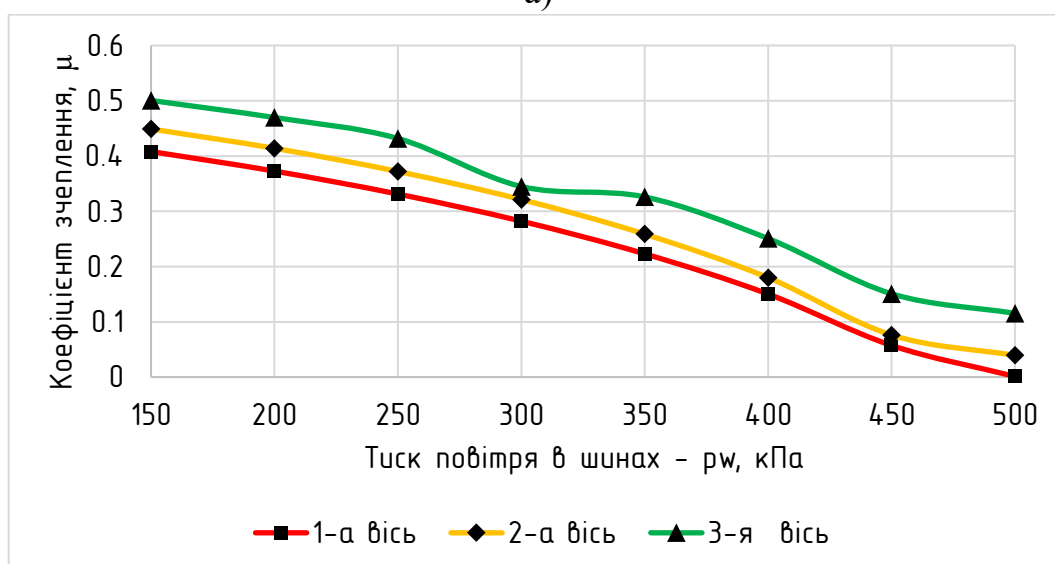


в)

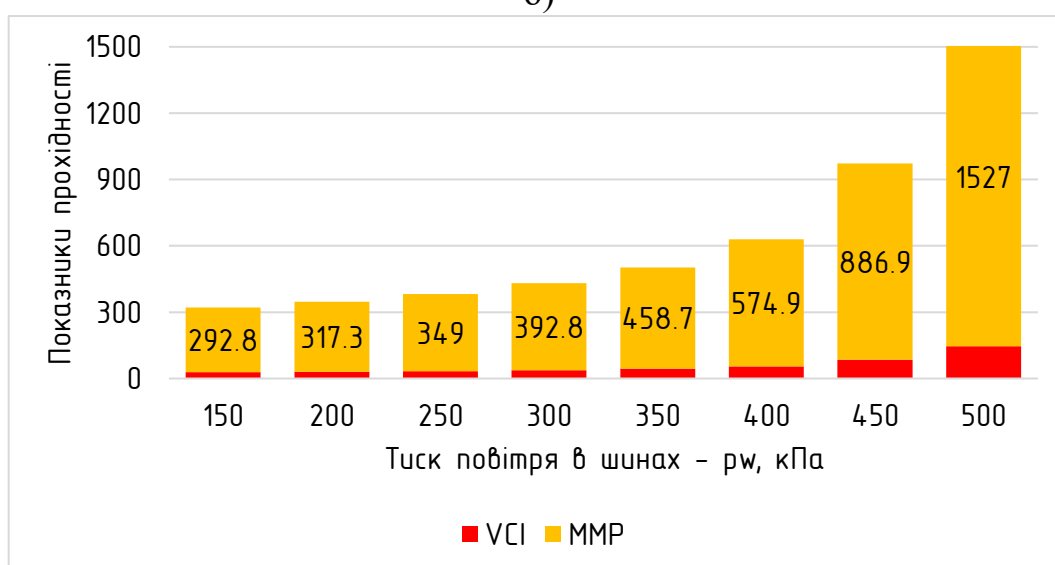
Рисунок 3.3 - Залежність коефіцієнтів опору руху а) та зчеплення б) та показників прохідності в) від тиску повітря в шинах для автомобіля КамАЗ-4310



а)

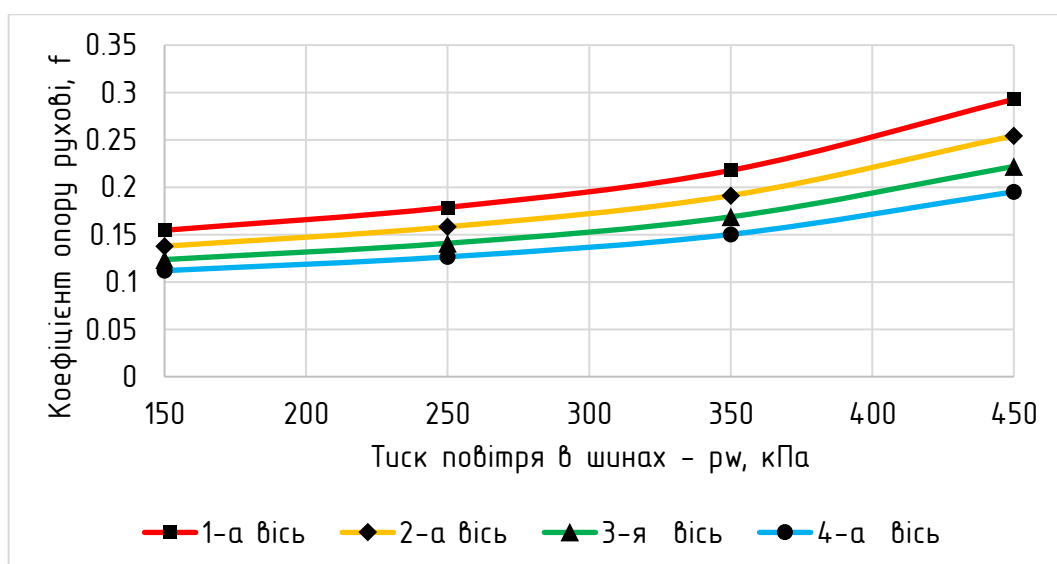


б)

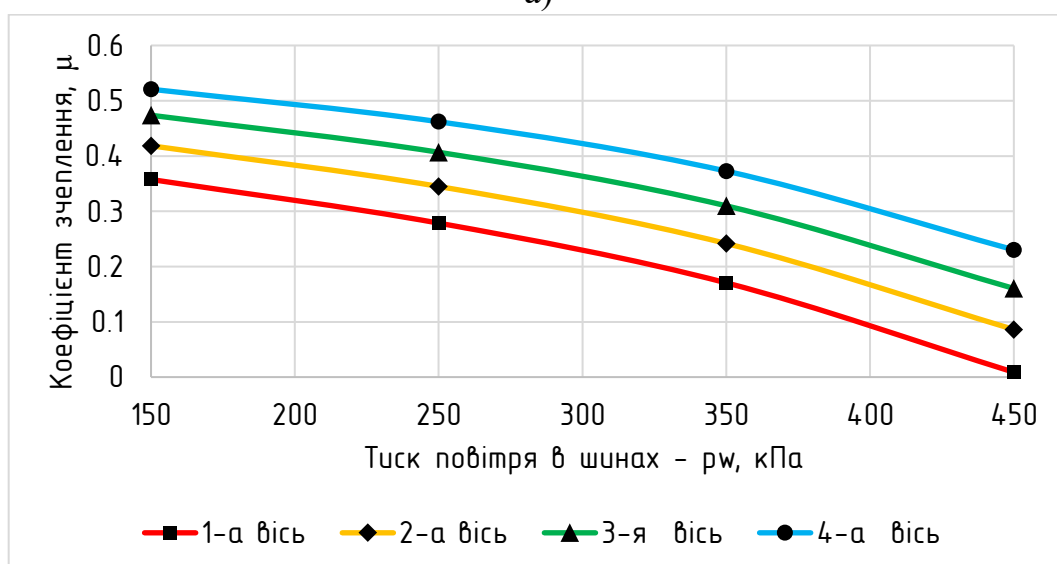


в)

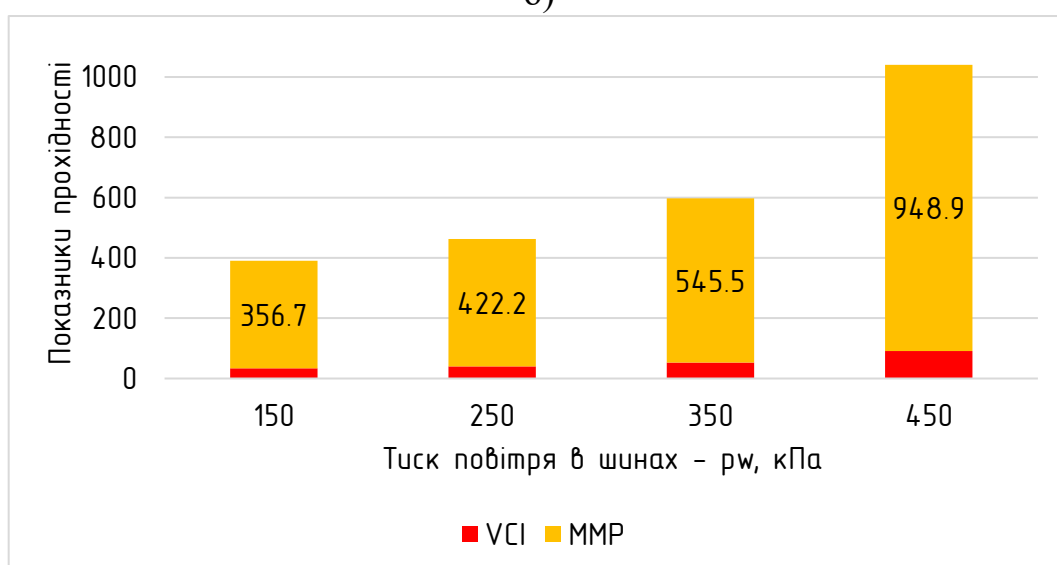
Рисунок 3.4 - Залежність коефіцієнтів опору руху а) та зчеплення б) та показників прохідності в) від тиску повітря в шинах для автомобіля КрАЗ-6322



а)



б)



в)

Рисунок 3.5 - Залежність коефіцієнтів опору руху - а), зчеплення - б) та показників прохідності - в) від тиску повітря в шинах для автомобіля БТР-4

Отримані результати показали наявність стійкої закономірності впливу тиску в шинах на взаємодію системи «колесо–ґрунт». Зменшення тиску в шинах усіх осей призводить до одночасного зниження коефіцієнта опору руху та зростання коефіцієнта зчеплення. Такий ефект пояснюється збільшенням площі контакту шини з ОП, зменшенням питомого тиску на ґрунт і відповідним зниженням глибини занурення колеса. Водночас характер отриманих залежностей є нелінійним і описується степеневими функціями, що свідчить про складну взаємодію пружнодеформаційних властивостей шини та ОП.

Аналіз зміни опору руху показав, що підвищення тиску в шинах на кожні 10 кПа спричиняє зростання опору руху для окремих осей у межах від 0,5% до 3,2% залежно від колісної формули автомобіля та навантаження на вісь. Найбільша чутливість до зміни тиску спостерігається у важчих транспортних засобів та в осях із підвищеним навантаженням, що пояснюється інтенсивнішим ущільненням ґрунту та зростанням втрат енергії на його деформацію.

Аналіз інтегральних показників прохідності VCI та MMR підтвердив збереження зазначених тенденцій на системному рівні. Зниження тиску в шинах приводить до підвищення значень показників прохідності для всіх досліджених компоновок, причому приріст є тим більшим, чим більша кількість ведучих осей автомобіля. Це свідчить про синергетичний ефект сумісного впливу багатовісної схеми та регулювання тиску в шинах.

Дослідження тягових властивостей підтвердило, що зменшення тиску забезпечує підвищення реалізованого зчеплення завдяки збільшенню довжини плями контакту та покращенню умов передачі зсувних напружень у ґрунті. При цьому ефект проявляється більш виражено для багатовісних компоновок. Автомобілі з колісними формулами 6×6 та 8×8 демонструють кращий відгук на зміну тиску порівняно з 4×4, що зумовлено рівномірнішим розподілом навантаження між осями та зменшенням локального перевантаження ґрунту.

Разом з тим, надмірне зниження тиску є недоцільним через зростання внутрішніх деформацій шини, збільшення тепловиділення та ризик експлуатаційних пошкоджень. За результатами аналізу встановлено, що

раціональний діапазон регулювання тиску становить 40–60 % від номінального значення. У зазначеному інтервалі забезпечується компроміс між зменшенням опору руху та збереженням високого рівня зчеплення, що дозволяє мінімізувати втрати енергії, підвищити ресурс шин і знизити ймовірність їх розбортовування під час руху по слабонесучих ґрунтах.

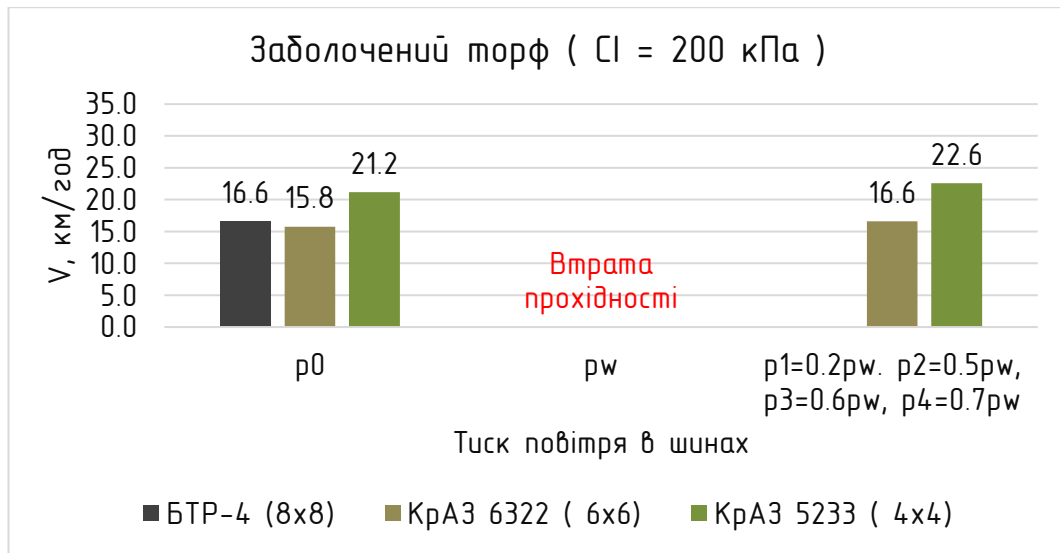
Додатково встановлено, що для автомобілів із нерівномірним розподілом навантаження між осями при зміні тиску в шинах простежується тенденція до вирівнювання опору руху окремих осей. Незважаючи на початкову відмінність у вертикальних навантаженнях, зниження тиску призводить до перерозподілу контактних напружень у плямі контакту та зміни умов деформації ґрунту, внаслідок чого значення коефіцієнтів опору руху осей зближуються. Такий ефект пояснюється зменшенням питомого тиску більш навантажених осей і відносним підвищенням ефективності роботи менш навантажених коліс, що забезпечує більш рівномірну реалізацію енергетичних витрат на подолання опору руху.

Таким чином, проведене дослідження підтвердило, що регулювання тиску в шинах є ефективним засобом підвищення прохідності автомобілів різних масових категорій. Найбільший ефект досягається для багатовісних повноприводних транспортних засобів, у яких зміна тиску забезпечує суттєве покращення тягово-енергетичних показників без істотного зростання опору руху. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування параметрів систем роздільного регулювання тиску в шинах та вибору раціональних режимів експлуатації автомобілів у складних дорожніх умовах.

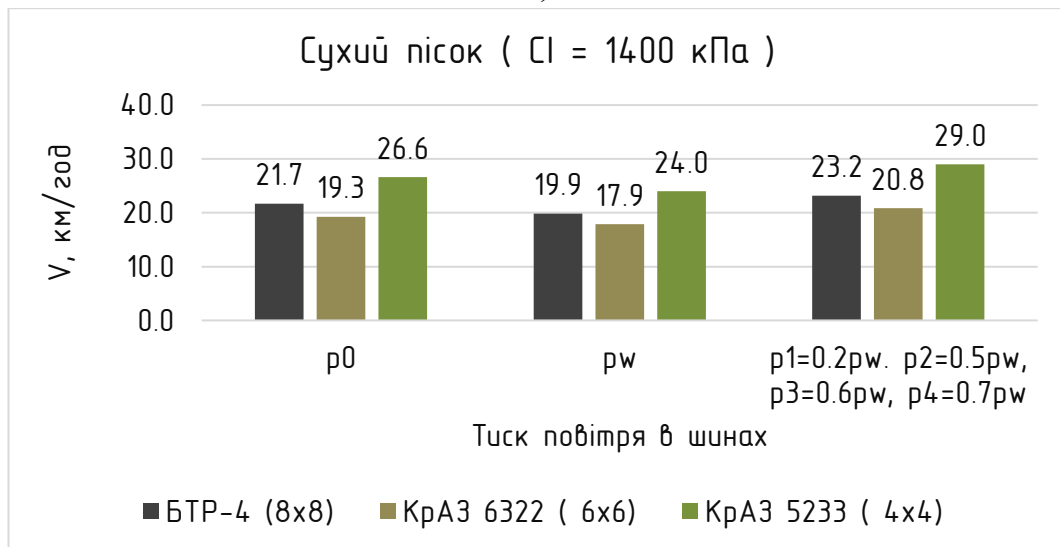
3.2 Регулювання тиску в шинах колісних схем 4x4, 6x6, 8x8 у взаємозв'язку з мобільністю автомобіля бездоріжжям

Показники прохідності ММР та VCI традиційно застосовуються для оцінювання відповідності параметрів автомобіля несучій здатності ґрунту. Показник VCI характеризує співвідношення між параметрами транспортного засобу та умовами ОП і дозволяє оцінити принципову можливість руху без втрати прохідності. Показник ММР, у свою чергу, відображає граничні умови взаємодії рушія з ґрунтом і використовується для кількісної оцінки потенційної прохідності автомобіля. Однак, зазначені критерії визначають переважно потенційну здатність до руху, тоді як швидкість є показником реалізованої мобільності. Саме вона демонструє, наскільки ефективно тяговий потенціал автомобіля реалізується за конкретних значень VCI та ММР. При однакових значеннях цих показників різні конструктивні рішення (колісна формула, розподіл навантаження, тиск у шинах) можуть забезпечувати різну швидкість руху, що свідчить про відмінності у втраті енергії на деформацію ґрунту, буксування. Тому, пропонується розглядати швидкість руху автомобіля на бездоріжжі як одну з основних інтегральних характеристик мобільності, оскільки вона безпосередньо відображає результат взаємодії транспортного засобу з ОП та узагальнює вплив тягових, енергетичних і ґрунтових факторів. На відміну від окремих параметрів взаємодії колеса з ґрунтом, швидкість характеризує фактичну ефективність переміщення автомобіля в реальних умовах експлуатації. Використання швидкості поряд із показниками ММР та VCI дозволяє перейти від оцінки потенційної прохідності до комплексної оцінки мобільності автомобіля на бездоріжжі, що забезпечує більш повне та інженерно обґрунтоване характеризування ефективності його руху.

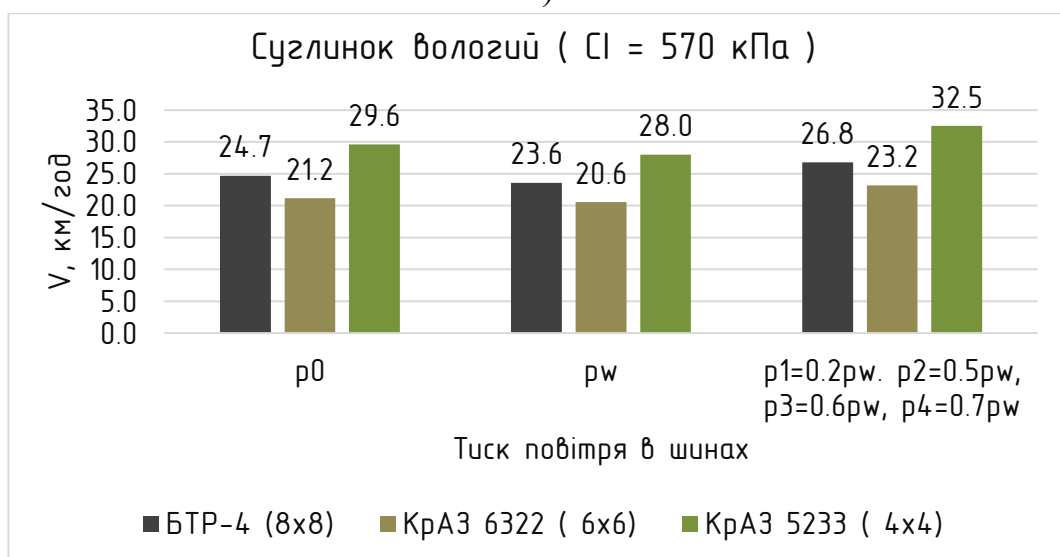
Максимально можлива швидкість руху визначалася для трьох варіантів колісних формул [249], при русі трьома ділянками бездоріжжя (рисунок 3.6). Значення CI та фізико-механічних характеристик ОП залежно від типу ґрунту та його стану обрано згідно статистичних даних (Додаток А).



а)



б)



в)

Рисунок 3.6 - Максимальна швидкість руху КМ торфом-а), піском – б) та суглинком – в) при різному тиску в шинах

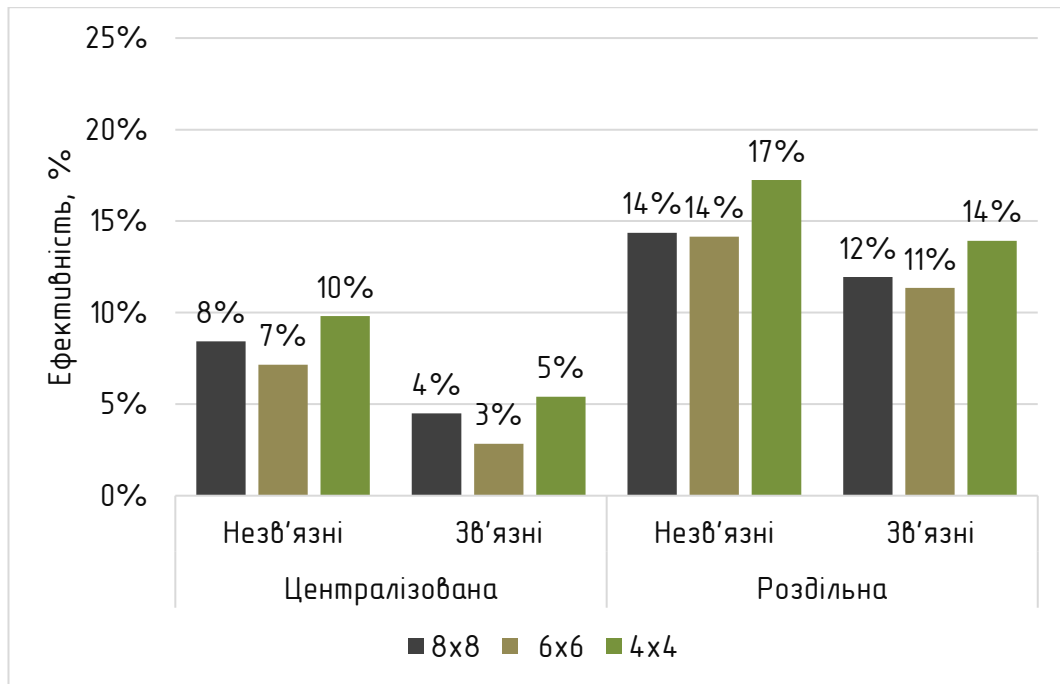


Рисунок 3.7 - Порівняльна оцінка ефективності систем регулювання тиску в шинах

З метою якісної оцінки отриманих у процесі моделювання результатів (рисунок 3.7) варто відзначити наступне:

- стосовно мобільності роздільна система регулювання тиску демонструє стабільно вищу ефективність незалежно від типу ґрунту та колісної схеми, в той час як ефективність централізованої падає на 50% при русі зв'язними ґрунтами;
- на заболочених обидві системи показали однакову ефективність, це пояснюється тим, що болото не ущільнюється і всі колеса рухаються в однакових умовах.

Отже, опрацьована в програмному середовищі MATLAB Simulink імітаційна модель руху КМ бездоріжжям з можливістю роздільного регулювання тиску в шинах дає змогу оцінити ефективність підвищення показників прохідності та мобільності повноприводних автомобілів на бездоріжжі за допомогою роздільного регулювання тиску в шинах. Отримані результати потребують, звичайно, відповідних експериментальних дослідів та оцінки рівня адекватності і є основою параметричної оптимізації системи розподілу тиску в шинах повноприводних КТЗ.

3.3 Висновки за розділом

У розділі виконано теоретичне дослідження впливу регулювання тиску в шинах на показники прохідності та мобільності повноприводних автомобілів у різних ґрунтових умовах. Розглянуто вплив конструктивних параметрів транспортних засобів, колісних формул та режимів роботи систем регулювання тиску на тягово-зчіпні властивості та інтегральні показники прохідності.

Встановлено, що зміна тиску в шинах є одним із ключових керуючих факторів формування взаємодії «колесо–ґрунт», оскільки безпосередньо впливає на площу контакту, питомий тиск на опорну поверхню, глибину колії та енергетичні втрати на деформацію ґрунту. Зниження тиску в межах раціональних значень призводить до зменшення опору руху та підвищення коефіцієнта зчеплення, що підтверджує можливість підвищення тягової ефективності без зміни силової установки.

На основі аналізу транспортних засобів різних масових категорій (4×4, 6×6, 8×8) встановлено, що ефект від регулювання тиску є нерівномірним і залежить від колісної формули та розподілу навантаження по осях. Найбільш суттєве підвищення показників прохідності спостерігається для багатовісних схем, що пояснюється більш рівномірною реалізацією зчіпних властивостей та зменшенням локальних перевантажень ґрунту.

Аналіз інтегральних показників VCI та ММР показав, що вони відображають переважно потенційну прохідність транспортного засобу, однак не повною мірою характеризують реальну мобільність у русі. У зв'язку з цим, обґрунтовано використання швидкості руху як додаткового узагальненого критерію, який інтегрує тягові, енергетичні і ґрунтові фактори та дозволяє оцінювати фактичну ефективність реалізації прохідності.

Дослідження показали, що швидкість руху істотно залежить від типу ґрунту та режиму регулювання тиску. На слабких і водонасичених ґрунтах зниження тиску в шинах забезпечує суттєве зростання максимально можливої швидкості за рахунок зменшення глибини занурення та покращення умов формування зсувних

напружень у зоні контакту. На більш щільних ґрунтах ефект проявляється менш інтенсивно, однак зберігається загальна тенденція підвищення мобільності.

Доведено, що централізовані та роздільні системи регулювання тиску мають різну ефективність залежно від умов руху. Роздільне регулювання забезпечує більш стабільні показники мобільності для всіх типів ґрунтів та колісних схем, оскільки дозволяє враховувати нерівномірність навантаження по осях і адаптувати контактні параметри кожного рушія окремо.

Встановлено існування раціонального діапазону тиску в шинах, в межах якого досягається оптимальне поєднання зниження опору руху та підвищення зчеплення. Вихід за межі цього діапазону призводить до зростання внутрішніх деформацій шини, підвищення енергетичних втрат або погіршення несучої здатності контакту.

Таким чином, проведені теоретичні дослідження підтвердили ефективність застосування системи роздільного регулювання тиску в шинах як інструменту підвищення прохідності та мобільності повноприводних автомобілів. Отримані результати створюють наукове підґрунтя для подальшої оптимізації алгоритмів адаптивного керування тиском у шинах та можуть бути використані при проектуванні транспортних засобів підвищеної прохідності для роботи в складних дорожньо-ґрунтових умовах.

РОЗДІЛ IV. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА АДЕКВАТНОСТІ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І РЕКОМЕНДАЦІЙ

4.1 Методика і апаратура експериментального дослідження

Експериментальна оцінка отриманих результатів теоретичного дослідження базується на [14, 225 та 226] і доповнена виходячи з наукового завдання, пропонованого методу підвищення прохідності та параметрів необхідних для оцінки адекватності математичної моделі.

Завдання польового експериментального дослідження – проведення порівняльного аналізу прохідності повноприводного автомобіля на різних ОП згідно критеріїв і параметрів, що рекомендовані заводом виробником та у відповідності пропонованому методу роздільного регулювання тиску в шинах.

Цілями експерименту є:

1. Оцінка ефективності пропонованого методу підвищення прохідності повноприводного автомобіля роздільним регулюванням тиску в шинах;
2. Оцінка адекватності розробленої імітаційної моделі руху повноприводного автомобіля по ОП, що деформується.

Показниками, що характеризують прохідність повноприводного автомобіля і дозволяють провести об'єктивне порівняння було обрано:

- максимальну швидкість руху V - км/год;
- глибину утвореної колії z - м;
- значення конусного індексу транспортного засобу за методикою WES VCI - кПа;
- значення максимального середнього тиску на ґрунт згідно методики RADRE ММР – кПа.

Для виконання поставлених цілей виконувалися заміри та реєстрація наступних параметрів:

- конусного індексу ОП мінімум у десяти точках вздовж передбачуваної траєкторії руху;

- тиску повітря в шинах з подальшим його вирівнюванням та роздільним регулювання залежно від етапу експерименту;
- радіальної деформації шин при різних тисках повітря в шинах;
- пройденого автомобілем шляху та максимально можливої швидкості руху на визначеній ділянці бездоріжжя.

Заміри вищевказаних параметрів виконувалися з синхронізацією процесу реєстрації, неперервність процесу забезпечувалася використанням вимірювального комплексу, до якого входили:

- портативний персональний комп'ютер;
- пенетрометр ЛАН-М PRO що відповідає стандарту ASAE S313.3 [14];
- цифровий манометр SDTG-4271;
- зовнішній GNSS – приймач G-Mouse VK-162 з частотою 10 Гц;
- спеціалізоване програмне забезпечення U-blox Center V2.



Рисунок 4.1 - Складові компоненти вимірювального комплексу: а – цифровий пенетрометр Лан-М PRO; б – зовнішній GNSS-приймач G-Mouse VK-162; в – цифровий манометр SDTG-4271

4.2 Експериментальні дослідження та оцінка і аналіз результатів

Згідно ГОСТ РВ 52048-2003 [225] прохідність автомобілів багатоцільового призначення пропонується оцінювати на чотирьох поширених типах бездоріжжя, зокрема:

- розмоклі на глибину не менше 0,1м ґрунті (глинисті, суглинок або чорнозем) при плюсовій температурі повітря дрібних опадах;
- вологі зорані на глибину 0,25-0,3м суглинки або чорноземи при відносній вологості поверхневого шару від 30 до 35%;
- сухі сипучі піски з глибиною залягання не менше 1,5м і вологістю поверхневого шару до 4% на глибину не менше 0,1м;
- засніжена цілина товщиною не менше 0,4м при щільності снігу 0,2 – 0,4 г/см³ і температурі не вище – 4°С.

У відповідності з вищевказаними рекомендаціями [225] та класифікацією типів бездоріжжя, було підібрано три експериментальні ділянки:

- ділянка №1 протяжністю 105 м та шириною 25 м в межах території Ясницького кар'єру розташованого на відстані 20 км на захід від м. Львів, що являє собою сухий пісок з природною вологістю 14,8% і перепадами висот профілю $\pm 0,1$ м (рисунок 4.2).
- ділянка №2 протяжністю 115м та шириною 50м в межах території Міжнародного центру миротворчості та безпеки (МЦМБ) Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, що являє собою супісок піщанистий з природною вологістю 15,3% і перепадами висот профілю $\pm 0,1$ м (рисунок 4.3).
- ділянка №3 протяжністю 118 м та шириною 35 м в межах території Міжнародного центру миротворчості та безпеки (МЦМБ) Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, що являє собою суглинок легкий піщанистий з природною вологістю 23,5% і перепадами висот профілю $\pm 0,1$ м (рисунок 4.4).



Рисунок 4.2 - Супутниковий та загальний вигляд ділянки №1 (сухий пісок)



Рисунок 4.3 - Супутниковий та загальний вигляд ділянки №2 (супісок піщаний)



Рисунок 4.4 - Супутниковий та загальний вигляд ділянки №3 (суглинок легкий)

Перед проїздами було визначено конусний індекс ґрунту СІ досліджуваних ділянок, із використанням пенетрометра за методикою оцінки [82, 231], прийнятою у стандартах з оцінки прохідності армій НАТО. Одночасно були

відібрані зразки для визначення основних фізико-механічних характеристик ґрунту обраних експериментальних ділянок, із використанням можливостей проектно-конструкторського об'єднання (ПКО) НУ "Львівська політехніка" (Додаток Г), що подані у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 - Фізико-механічні характеристики ґрунту експериментальних ділянок бездоріжжя

№ з/п	Тип і стан ОП	Густина непорушеної структури ґрунту, г/см ³	Вологість, %	Е, МПа	СІ, кПа
1	Сухий пісок	1,50	14,8	2,53	1430
2	Супісок піщанистий	1,76	15,3	0,82	570
3	Суглинок легкий	1,88	23,5	1,25	610

Випробування виконувалися в два етапи на автомобілях УАЗ-469 [248], Краз-5233 та КамАЗ-4310 [231], які пройшли чергове ТО і ТК. Технічний стан транспортних засобів перебував у межах норм, що відповідають технічним умовам заводу виробника, нормативній та експлуатаційній документації.

На першому етапі з метою оцінки адекватності методики WES автомобілі Краз-5233 та КамАЗ-4310 було споряджено згідно технічної документації та встановлено вимірювальні пристрої.



а



б

Рисунок 4.5 - Експериментальні дослідження прохідності КТЗ : а – загальний вигляд автомобіля КрАЗ-5233; б – загальний вигляд автомобіля КамАЗ-4310.

В результаті експериментальних досліджень [231] отримані максимально можливі швидкості руху, для КамАЗ-4310 та КрАЗ-5233 розповсюдженими на території України типовими ОП (бездоріжжям).

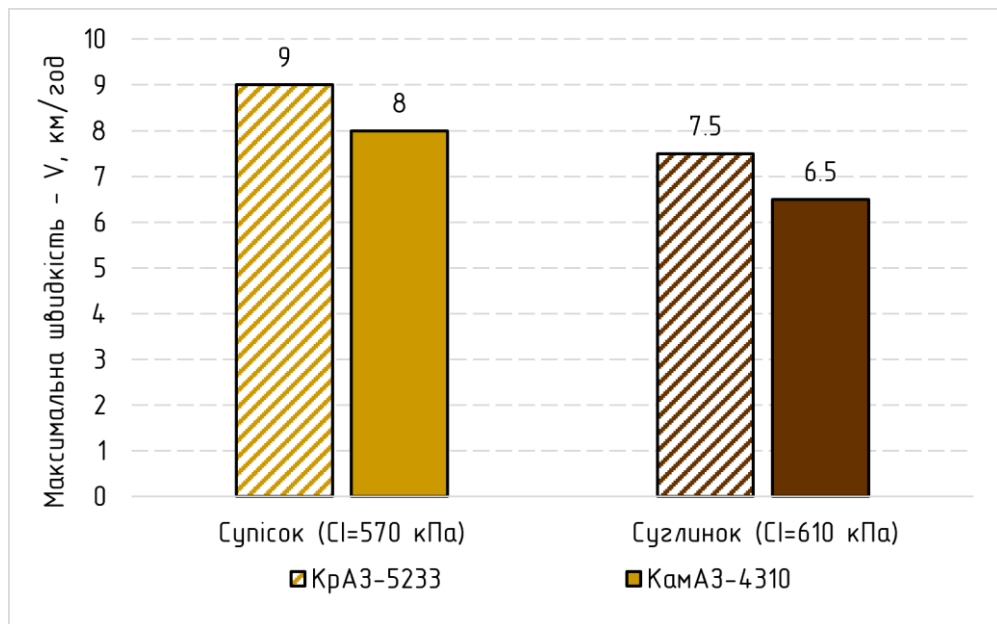


Рисунок 4.6 - Графіки отриманих результатів експериментальних значень швидкості руху КрАЗ-5233 та КамАЗ-4310

Порівняльна оцінка отриманих результатів експериментальних досліджень дозволяє констатувати, що швидкість руху бездоріжжям КрАЗ-5233 на 10–15% вища, ніж у КамАЗ-4310. При цьому навантаження коліс на ОП у КрАЗ-5233 в 1,4 рази більше. Враховуючи усталену думку щодо прямої залежності зниження швидкості руху бездоріжжям від збільшення навантаження коліс зразка ВАТ на ОП, такий результат пояснюється кращим підбором характеристик двигуна, трансмісії та шин у КрАЗ-5233.

Також слід констатувати, що оцінка прохідності на підставі показників прохідності VCI, MN, MMR потребує певного коригування щодо параметрів і характеристик силового приводу, розподілу навантажень на осі і деталізації характеристик шин. Проте, вона вигідно вирізняється з точки зору практичного використання у військах звичного з часів СРСР показника “питома сила тяги на буксирному гаку”, значення якого на конкретній ОП з умов тягового балансу суттєво зменшується зі збільшенням швидкості руху.

Другим етапом стало проведення випробування з метою оцінки адекватності модифікованої з точки зору регулювання тиску повітря в шинах методики WES [248]. Для цього автомобіль УАЗ-469 було споряджено згідно технічної документації та встановлено вимірювальні пристрої. З метою підвищення точності вагові параметри були визначені шляхом послідовного зважування при наїзді на платформу ваги коліс переднього та задньої осі. Процедура зважування та технічний огляд проводилися на базі ТзОВ «Автотранс-ДІК» з використанням сертифікованого обладнання, відповідність якого підтверджена чинним атестатом про акредитацію (Додаток Д).



а)



б)

Рисунок 4.7 - Експериментальні дослідження впливу регулювання тиску на прохідність : а – загальний вигляд автомобіля УАЗ-469; б – процес зважування та ТО.

На автомобілі були встановлені пневматичні шини типорозміру 235/75R15, з універсальним рисунком протектора, без видимих зовнішніх пошкоджень, з зношенням протектора не більше 5% від початкової висоти. Тиск повітря в шинах під-час проведення випробувань змінювався в діапазоні від мінімального (70 кПа) до максимального (200 кПа). Початковим етапом випробувань був контрольний пробіг зразка по маршруту протяжністю 30 км з середньою швидкістю 40км/год, що сприяло прогріву агрегатів до робочих температур.

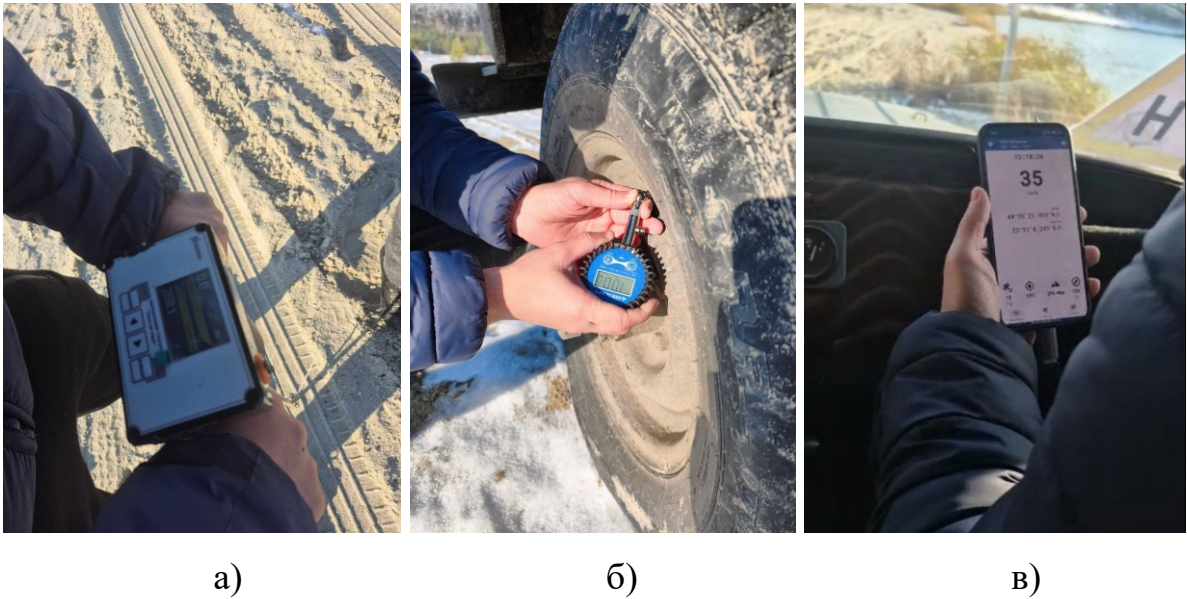


Рисунок 4.8 - Ключові етапи збору експериментальних даних: а – визначення конусного індексу ОП; б – регулювання тиску повітря в шинах; в – отримання значення максимальної швидкості руху.

За результатами експериментальних досліджень впливу роздільного регулювання тиску на прохідність УАЗ-469 (таблиця 4.2) слід констатувати підтвердження висунутої раніше гіпотези про підвищення прохідності за допомогою роздільного регулювання тиску повітря в шинах [249, 251 та 252].

Таблиця 4.2 - Показники прохідності УАЗ-469 при різних значеннях тиску повітря в шинах.

Показник прохідності	Розподіл тиску повітря в шинах p_1/p_2 , кПа					
	Централізований			Роздільний		
	200/200	150/150	100/100	150/200	100/150	70/100
VCI	35,52	35,35	28,99	33,50	30,05	27,65
MN	11,01	11,52	12,29	11,25	11,85	12,6
MMP, кПа	370	337	302	349	313	288
V_{max} , км/год	15	23	30	33	35	36

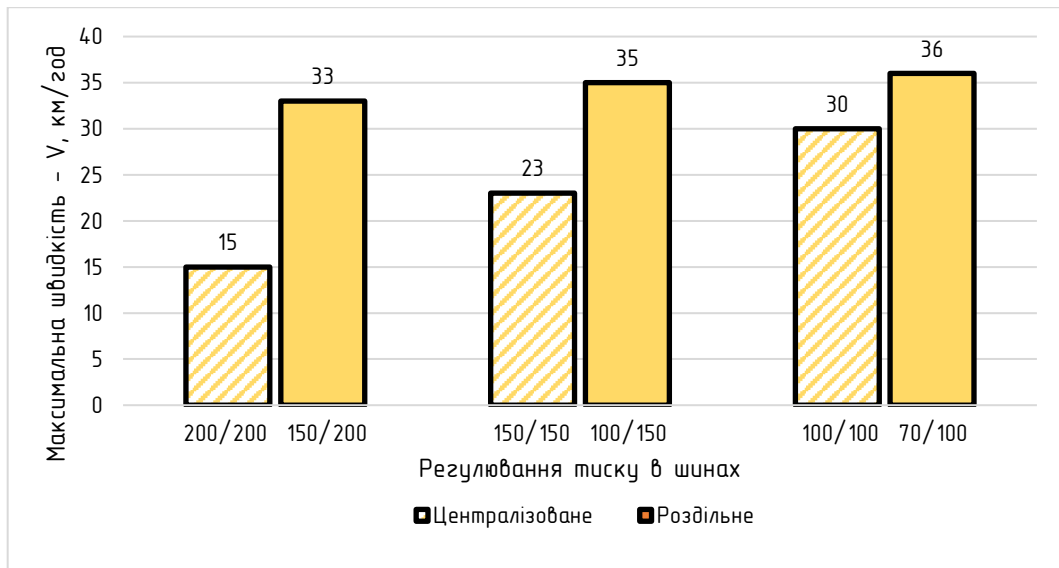


Рисунок 4.9 - Графіки отриманих експериментальних значень швидкості руху бездоріжжям УАЗ-469 при різних тисках повітря в шинах

Встановлено, що підбір тиску в шинах для різних осей дозволяє більш повно реалізувати тягово-зчіпний потенціал коліс, зумовлений відмінностями у фізико-механічних характеристиках ОП та ступені її ущільнення після проходження передньої осі. Експериментально доведено, що при роздільному регулюванні тиску повітря в шинах максимальна швидкість руху автомобіля УАЗ-469 бездоріжжям зростає в середньому на 15–20 % порівняно з централізованим регулюванням. Одночасно зафіксовано покращення показників прохідності, визначених за методиками WES та MMP, що свідчить про підвищення ефективності взаємодії шини з ґрунтом та зниження питомих втрат енергії на подолання опору рухові.

Отримані результати є базою для подальшої оцінки адекватності імітаційної моделі отриманої в програмному середовищі MATLAB Simulink для заданих характеристик зразків КТЗ і типів ОП з визначеними експериментально механічними характеристиками.

4.3 Оцінка адекватності імітаційного моделювання руху бездоріжжям на базі експериментальних досліджень

Оцінка адекватності моделі визначення прохідності та максимальної технічної

швидкості руху здійснювалася на базі відповідних експериментальних досліджень КрАЗ-5233 та КамАЗ-4310 в умовах МЦМБ зазначеними ОП (таблиця 4.1). На рисунках 4.10 та 4.11 наведено результати максимально можливої швидкості руху зразків КТЗ на базі емпіричних залежностей методики WES та експериментальні дані. Варто констатувати достатню збіжність отриманих результатів у межах 0,9-2,3 км/год залежно від типу ОП.

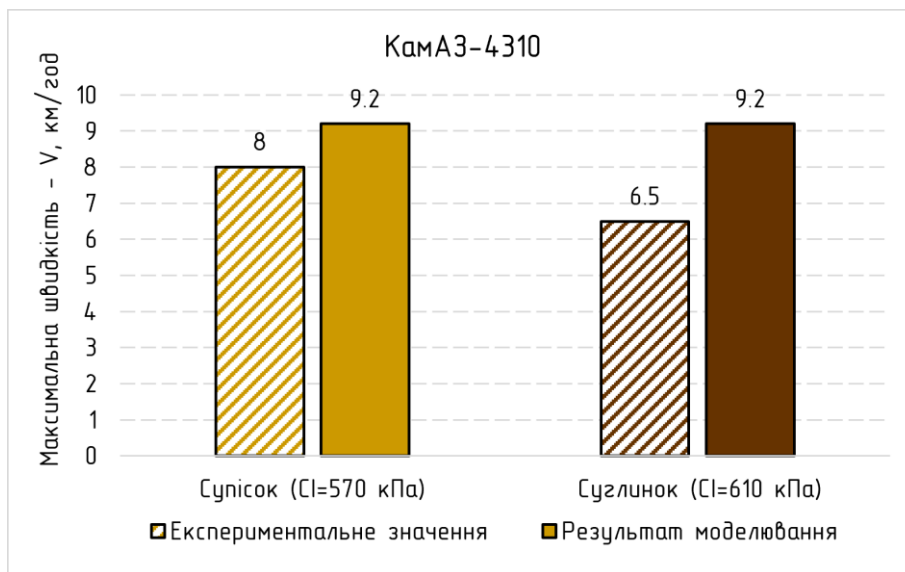


Рисунок 4.10 - Результати розрахункових даних та експериментальних досліджень руху КамАЗ-4310 бездоріжжям

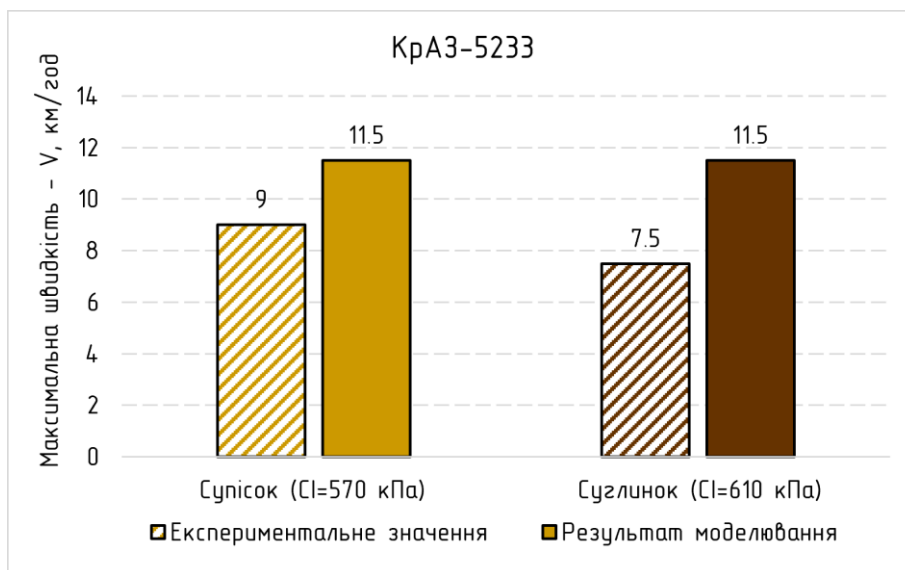


Рисунок 4.11 - Результати розрахункових даних та експериментальних досліджень руху КрАЗ-5233 бездоріжжям.

Оцінка адекватності імітаційної модифікованої з точки зору регулювання тиску повітря в шинах моделі WES проводилася під час здійснення руху дослідних зразків повноприводних автомобілів на швидкостях різними типами ОП, зокрема сухим піском зі зміною тиску повітря в шинах від мінімального до номінального (відповідно до характеристик шин, що використовуються. Для проведення порівняльної оцінки експериментальних і теоретичних даних як параметри було обрано залежності максимальної швидкості руху від встановленого тиску повітря в шинах (рисунки 4.12, 4.13).

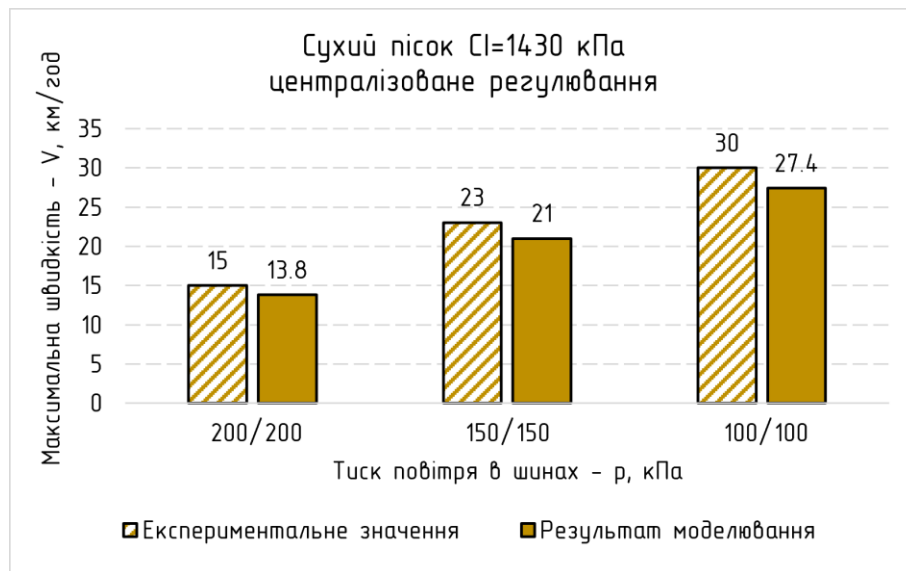


Рисунок 4.12 - Результати розрахункових даних та експериментальних досліджень руху УАЗ-469 при централізованому регулюванні тиску

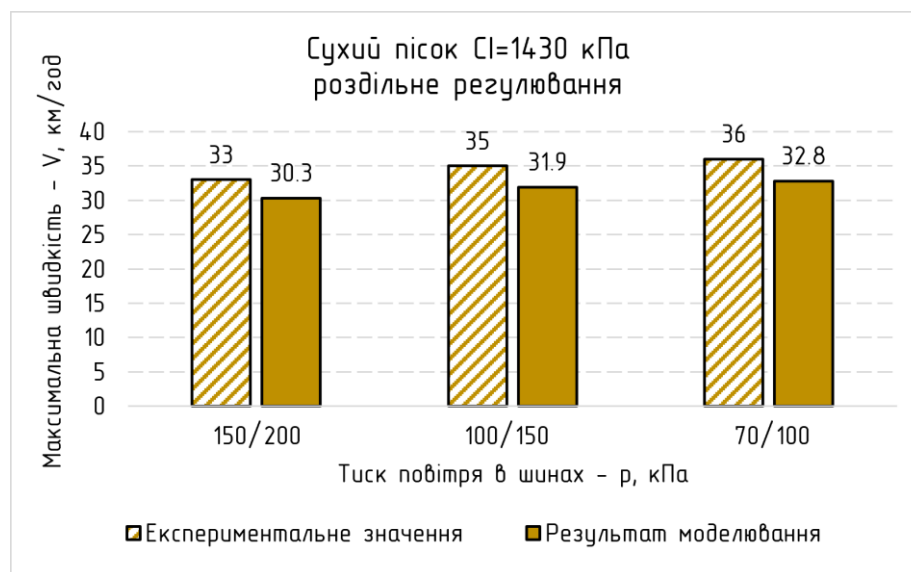


Рисунок 4.13 - Результати розрахункових даних та експериментальних досліджень руху УАЗ-469 при роздільному регулюванні тиску

Проведений аналіз отриманих залежностей, поданих на рисунках 4.10–4.13, дає змогу зробити висновок, що залежності, отримані за результатами моделювання перебувають у межах довірчого інтервалу та повністю відповідають характеру кривих зміни максимальної швидкості як функції тиску повітря в шині, отриманих за результатами експериментальних досліджень. При цьому похибка моделювання руху не перевищує 9 %.

4.4 Формування рекомендацій щодо роздільного регулювання тиску у шинах

На основі проведеного розрахункового експерименту встановлено, що для кожного обраного типу ОП залежно від колісної схеми транспортного засобу існує певний діапазон раціонального зниження тиску повітря в шині, який забезпечує мінімальні енергетичні витрати на її кочення. Встановлено, що загальну стратегію роздільного регулювання тиску повітря в шинах визначає перша вісь транспортного засобу, оскільки саме вона здійснює первинне деформування ОП та формує початкові параметри колії для наступних осей. Характер взаємодії першої осі з ґрунтом визначає ступінь ущільнення, зміну СІ та несучу здатність поверхні, що безпосередньо впливає на величину опору руху наступних коліс.

З метою зменшення втрат енергії на внутрішню деформацію шин передньої осі, а також запобігання їх перевантаженню і можливим пошкодженням при русі, доцільно задавати тиск повітря в межах 40–60 % від номінального значення. Таке зниження тиску забезпечує збільшення площі плями контакту, зменшення питомого тиску на ґрунт та покращення тягово-зчіпних властивостей без істотного зростання втрат на гістерезис матеріалу. Значення тиску повітря в шинах кожної наступної осі рекомендується визначати за залежністю:

$$p_i = \frac{(p_w - p_1)}{n} + p_{i-1} \quad (4.1)$$

де: n – кількість осей, p_w – номінальний тиску в шині; p_i – тиск в шинах окремої осі.

На основі узагальнення результатів розрахунків та їх систематизації, визначено діапазони оптимальних коефіцієнтів зниження тиску повітря в шинах для автомобілів із різними колісними схемами. Отримані значення наведено в таблиці 4.3. Представлені результати свідчать, що застосування роздільного регулювання тиску дозволяє сформувати узгоджений режим роботи шин усіх осей, зменшити сумарний опір руху та підвищити енергоефективність руху транспортного засобу на бездоріжжі.

Таблиця 4.3 – Оптимальні значення коефіцієнтів зниження тиску повітря в шинах

Коефіцієнт зниження тиску	Колісна схема		
	4x4	6x6	8x8
1-а вісь	0,4-0,6	0,4-0,6	0,4-0,6
2-а вісь	0,7-0,8	0,6-0,75	0,55-0,7
3-я вісь	-	0,8-0,85	0,7-0,8
4-а вісь	-	-	0,85-0,9

4.5 Практичні рекомендації по конструктивному синтезу системи роздільного регулювання тиску в шинах

Для підвищення ефективності штатної системи регулювання CTIS шляхом розробки системи роздільного регулювання тиску (ITPCS) повітря в шинах залежно від типу ґрунту, запропоновано технічне рішення, загальний вигляд якого наведено на рисунку 4.14.

Регулювання тиску повітря в шинах коліс кожної осі автомобіля здійснюється за рахунок системи ITPCS, яка містить у своєму складі: компресор (1), зворотній клапан (2), ресивер (3), давач тиску повітря (4), блок керування (5), кабель живлення (6), кабель керування (7), кабель індикації (8), електромагнітні регулятори тиску за кількістю осей (9, 10), зворотні клапани коліс (11).

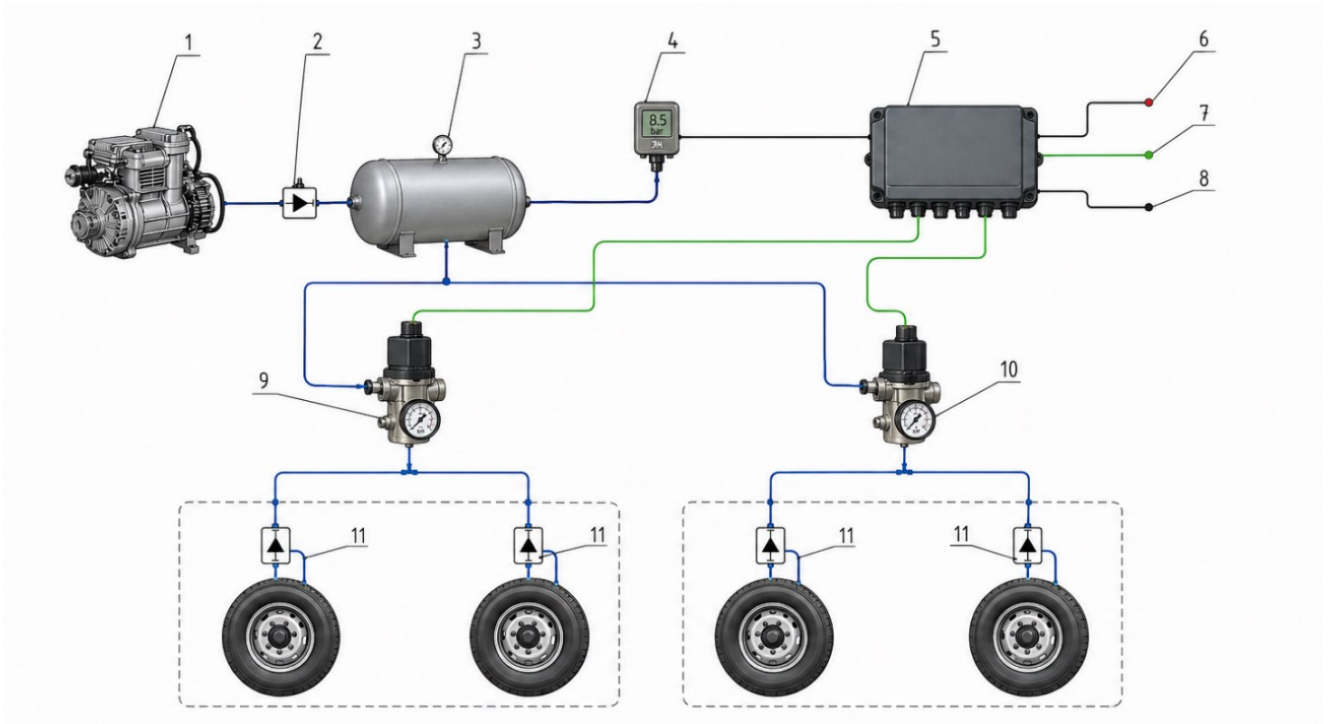


Рисунок 4.14 - Схема пропонованої конструкції системи ІТРС

Стиснене повітря створюється компресором (1) і через зворотний клапан (2) подається в ресивер (3). Зворотний клапан (2) запобігає перетіканню повітря назад до компресора при його зупинці. У ресивері (3) формується запас стисненого повітря, необхідний для стабільної роботи системи. Поточний тиск у магістралі контролюється давачем тиску (4), сигнал з якого надходить до блоку керування (5). Блок керування (5) отримує живлення (6) та сигнал керування (7).

На основі заданого режиму блок (5) формує керуючі сигнали для регуляторів (редукторів) тиску для кожної осі. Стиснене повітря з ресивера (3) подається до регуляторів тиску осей (9 та 10). Регулятори (9, 10) забезпечують зниження тиску до заданого рівня та підтримують стабільний тиск незалежно від коливань у магістралі. Після регуляторів повітря розподіляється по колесах відповідної осі через магістралі. Перед кожним колесом встановлені зворотні клапани (11), які запобігають втраті тиску в усій системі при пошкодженні окремої шини, забезпечують локалізацію витоку, стабілізують тиск у кожному колесі. У разі виходу з ладу електронної системи керування робота системи регулювання тиску повітря в шинах здійснюється як у звичайній системі.

4.6 Висновки за розділом

У розділі виконано експериментальні дослідження прохідності повноприводних автомобілів у різних ґрунтових умовах, а також проведено оцінку адекватності розробленої імітаційної моделі руху бездоріжжям та ефективності запропонованого методу роздільного регулювання тиску в шинах.

Встановлено, що використана методика експериментальних випробувань забезпечує достатню точність і відтворюваність результатів завдяки комплексному застосуванню сертифікованого вимірювального обладнання (пенетрометр, GNSS-приймач, цифрові манометри) та синхронізованої реєстрації параметрів руху, стану ґрунту і тиску в шинах. Це дозволило отримати узгоджені дані щодо взаємодії колісних машин із ОП різного типу.

Проведені польові випробування показали, що зміна тиску в шинах суттєво впливає на показники прохідності, зокрема максимальну швидкість руху, глибину колії та інтегральні критерії VCI і MMP. Експериментально підтверджено, що зниження тиску в шинах у межах раціональних значень забезпечує покращення тягово-зчіпних властивостей та підвищення швидкості руху на бездоріжжі, при цьому ефект є найбільш вираженим на слабонесучих ґрунтах.

Порівняльний аналіз результатів випробувань автомобілів різних типів (4×4, 6×6) засвідчив, що конструктивні особливості силового агрегату, трансмісії та шин істотно впливають на реалізацію тягового потенціалу. Встановлено, що навіть за більшого навантаження на осі окремі зразки демонструють вищі швидкісні показники, що підтверджує необхідність комплексного врахування всіх елементів енергетичного балансу транспортного засобу при оцінці прохідності.

Отримані експериментальні дані дозволили виконати верифікацію розробленої імітаційної моделі. Встановлено, що розбіжність між розрахунковими та експериментальними значеннями максимальної швидкості руху не перевищує 9 %, що свідчить про достатній рівень адекватності моделі та можливість її використання для інженерних розрахунків і прогнозування прохідності.

Додатково підтверджено, що модифікована модель WES з урахуванням роздільного регулювання тиску в шинах адекватно відтворює характер зміни показників прохідності залежно від тиску. Експериментально встановлено, що роздільне регулювання забезпечує підвищення максимальної швидкості руху в середньому на 15–20 % порівняно з централізованим, що узгоджується з результатами теоретичних досліджень.

На основі узагальнення результатів визначено раціональні режими регулювання тиску в шинах, які забезпечують оптимальний баланс між зниженням опору руху, підвищенням зчеплення та допустимими деформаціями шин. Встановлено, що найбільш ефективним є зниження тиску до 40–60 % від номінального значення з диференціацією по осях, що дозволяє узгодити роботу багатовісної системи та зменшити сумарні втрати енергії.

Розроблено та обґрунтовано конструктивну схему системи роздільного регулювання тиску в шинах, яка забезпечує автоматичну адаптацію тиску до навантаження на кожну вісь. Показано, що впровадження такої системи дозволяє підвищити прохідність транспортного засобу, знизити витрату енергії на подолання опору руху та підвищити загальну ефективність експлуатації в складних дорожньо-грунтових умовах.

Таким чином, результати експериментальних досліджень підтвердили достовірність теоретичних положень та адекватність розробленої імітаційної моделі, а також довели ефективність застосування роздільного регулювання тиску в шинах як інструменту підвищення прохідності повноприводних автомобілів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладне завдання підвищення прохідності повноприводних автомобілів в умовах бездоріжжя шляхом роздільного регулювання тиску повітря в шинах. Основні результати полягають в наступному:

1. Існуючі методи оцінювання прохідності (VCI, MMP, MN) мають обмежену чутливість до зміни тиску в шинах і не враховують нерівномірність навантаження по осях і зміну стану ґрунту після проходу коліс, що знижує точність оцінки.

2. Розроблено та реалізовано в середовищі MATLAB Simulink імітаційну модель руху повноприводного автомобіля бездоріжжям, яка забезпечує можливість незалежного регулювання тиску в шинах окремих осей з метою підвищення прохідності.

3. Теоретично встановлено закономірності впливу тиску в шинах на показники прохідності: зниження тиску в раціональних межах призводить до зменшення опору руху та підвищення коефіцієнта зчеплення. Раціональний діапазон тиску становить 40–60 % від номінального значення для коліс першої осі з подальшим збільшенням його значення в 1,2-1,5 рази для наступних осей.

4. Експериментально підтверджено адекватність розробленої моделі: розбіжність між розрахунковими та експериментальними результатами не перевищує 9 %. Встановлено, що роздільне регулювання тиску забезпечує підвищення максимальної швидкості руху на 15–20 % та покращення інтегральних показників прохідності.

5. Проведені дослідження дозволили сформулювати проект національного стандарту – ДСТУ В «Військова техніка. Прохідність. Вимоги та оцінка відповідності. Опрацьовані в даній роботі методи і результати прийняті та використовуються в ВАТ «Укравтобуспром» та ТОВ «Завод Електронмаш» в дослідно-конструкторських роботах. Запропоновану конструктивну схему системи роздільного регулювання, визнано придатною для впровадження у транспортних засобах підвищеної прохідності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abdel-Fattah A, Youssef A. Determination of soil parameters using plate test. *J Terramechanics* 1982;19:129–47.
2. Adams B.T. (2002): Central tire inflation for agricultural vehicle. [Ph.D. Thesis.] Urbana, University of Illinois at Urbana-Champaign: 130.
3. Adsit A.H., Clark R.L. Tractive and energy performance of a small four wheel drive tractor. ASAE Paper # 81-1042. St. Joseph (MI) 49085: ASAE; 1981.
4. Adsit A.H, Clark R.L. Wheel to wheel variability in slip on a four wheel drive tractor. ASAE Paper # 83-1054. St. Joseph (MI) 49085: ASAE; 1983.
5. Ageikin IAS. Off-the-road mobility of automobiles. New Delhi: Amerind Pub. Co.; 1987. 236p.
6. Ageikin IAS. Off-the-road wheeled and combined traction devices. Theory and calculations. New Delhi: Amerind Pub. Co.; 1987. 202p.
7. Ahlvin R.B., Haley P.W., 1992. NATO Reference Mobility Model Edition II, NRMM II Users Guide. Technical Report GL-92-19, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, U.S.A.
8. Ahmed A.E.E., El Hariri A., Kiss P. Soil strength and load bearing capacity measurement techniques. *Hung. Agric. Eng.* 2021,40,16–27.
9. Albright E.H., Claar I.I., Marley S.J. Computer simulation of agricultural tires. ASAE Paper # 85-1023. St. Joseph (MI) 49085: ASAE; 1985.
10. Al-Hamed S.A., Grisso R.D., Zoz F.M., Von Barga K. Tractor performance spreadsheet for radial tires. *Comput Electron Agric* 1994;10:45–62.
11. Alimardani R., Covin T.S., Marley S.J. Verification of the “TERMS” traction prediction model. *Trans ASAE* 1989;32:817–31.
12. Altunel A.O., De Hoop C.F. (1998): The effect of lowered tire pressure on a log truck driver seat. *International Journal of Forest Engineering*, 9: 41–47.
13. Armstrong S. (2008): Let tyres take the pressure. *Forestry and Timber News*.
14. ASAE Standards, 49th Ed. 2002a. S313.3. Soil cone penetrometer. St. Joseph, Mich.: ASAE.

15. ASAE Standards, 49th Ed. 2002b. EP542. Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer. St. Joseph, Mich.: ASAE.
16. ASAE. Machinery management data. ASAE standards. D230.4. St. Joseph (MI) 49085: ASAE; 1987. p. 89–147.
17. Ashmore C., Sirois D.L. (1987): Influence of the Central Tire Inflation System on Log Truck Performance and Road Surfaces. Paper No. 87–1057. St. Josef, Society of Automotive Engineers: 27.
18. Ashmore C., Burt C., Turner J.L. An empirical equation for predicting tractive performance of log skidder tires. *Trans ASAE* 1987;30:1231–6.
19. Ayers P.D. Utilizing the torsional shear test to determine soil strength properties relationships. *Soil Tillage Res* 1987;10:373–80.
20. Ayers, P.D. and J.V. Perumpral. 1982. Moisture and density effect on cone index. *Transactions of the ASAE*, 25: 1169-1172.
21. Bashford L.L., Von Bargaen K., Way T.R., Xiaoxian L. Performance comparisons between duals and singles on rear axles of a front wheel assist tractor. *Trans ASAE* 1987;30:641–5.
22. Battiato, A., Diserens E. Influence of Tyre Inflation Pressure and Wheel Load on the Traction Performance of a 65 kW MFWDTractor on a Cohesive Soil. *J. Agric. Sci.* 2013,5, 197.
23. Bekker M.G. *Theory of Land Locomotion; the mechanics of vehicle mobility.* The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1956.
24. Bekker M.G. *Introduction to terrain–vehicle systems.* Ann Arbor: The Univ. Michigan Press; 1969. 846p.
25. Bekker M.G. *Off-the-road locomotion. Research and developments in Terramechanics.* Ann Arbor: The University of Michigan Press; 1960. 220p.
26. Bloome P.D., Summers J.D., Khalilian A., Batchelder D.G. Ballasting recommendations for 2WD and 4WD tractors. ASAE Paper # 83 1067. St. Joseph (MI) 49085: ASAE; 1983.
27. Bradford, J. M. 1980. The penetration resistance in a soil with well–defined structural units. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44(3): 601–606.

28. Bradley A.H. (1995): Lower Tire Pressures Lessen Sedimentation from Forest Roads. Vancouver, Forest Engineering Research Institute of Canada: 2.
29. Bradley A.H. (2009): Introduction to Tire Pressure Control Systems (TPCS) and Synthesis of Key Research Findings in Highway and Urban Applications. Report No. CR-4554A-1. Vancouver, FPinnovations: 34.
30. BrITPCSh Ministry of Defence, 2005. Defence Standard 23-6, Technology Guidance for Military Logistics Vehicles, Issue 4.
31. Brixius W.W. Traction prediction equations for bias ply tires. ASAE Paper No, 87-1622. St. Joseph (MI) 49085-9659: ASAE; 1987.
32. Bulley B., Blair C. (2001): Using reduced tire pressure for improved gradeability – a proof of concept trial. In: Schiess P., Krogstad F. (eds): Proceedings of the International Mountain Logging and 11th Pacific Northwest Skyline Symposium, Seattle, Dec 10–12, 2001: 162–167.
33. Byerly D.V., Bashford L.L., Grisso R.D., Von Bargen K. Tractive performance and fuel consumption of a 2WD tractor. SAE Paper # 89-1837. Warrendale (PA) 15096-400: Commonwealth Dr.; 1989.
34. Chan B. J. And Sandu C. A novel wheel-soil interaction model for off-road vehicle dynamics simulation. In Proceedings of ASME IDETC, 9th Int. Conf. on AVTT, Sept. 4-7, 2007, Las Vegas, NV.
35. Chan B.J. And Sandu C. A semi-analytical approach to off-road tire modeling for vehicle dynamics simulations. In Proceedings of 16th ISTVS International Conference, Turin, Italy, 2008.
36. Chan B.J., Thompson N., Sandu C., and Dankowicz H.. A novel tire-soil interaction model for simulation of off-road vehicles. In Proceedings of 14th ISTVS International Conference, Sept. 25-29, 2005, Hayama, Japan.
37. Chan B.J.. Development of an off-road capable tire model for vehicle dynamics simulations. PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 2008.
38. Clark R.B. (1993): Central Inflation from a Truck Tire Perspective. Warrendale, Society of Automotive Engineers: 15.

39. Clark R.L. Tractive modelling and field data requirements to predict traction. ASAE Paper # 84-1055. St. Joseph (MI) 49085: ASAE; 1984.
40. Clark R.L. Tractive modelling with the modified Wismer and Luth model. ASAE Paper # 85-1049. St. Joseph (MI) 49085: ASAE; 1985.
41. Clark, R.L. 1999. Evaluation of the potential to develop soil strength maps using a cone penetrometer. ASAE Paper No. 993109. St. Joseph, Mich.: ASAE.
42. Cline C. (2016): Optimizing Truck Tyre Pressures with Ven tral Tyre Inflation. Moe, AIR CTI: 121.
43. Collins J.G. 1971. Forecasting Trafficability of Soils; relations of strength to other properties of fine-grained soils and sands with fines. Technical Memorandum 3 331, Tenth Supplement. Vicksburg, MS: US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station.
44. Diserens. E. (2009). Calculating the contact area of truck tyres in the field. Soil & Tillage Research, 103(2), 302-309. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.10.020>
45. Dong R.L. and Kyeong K., "Effect of inflation pressure on tractive performance of bias-ply tyres" Journal of terramechanics, Vol. 34 No. 3 pp. 187- 208, 1997.
46. Drucker, D.C., Greenberg, J., and Prager, W., 1952, "Extended Limit Design Theorems for Continuous Media", Quarterly of Applied Mathematics, 9: pp. 381-389.
47. Dwyer M.J., Heigho D.P. The tractive performance of some large tractor drive wheel tires compared with dual wheels. J Agric Eng Res 1984;29:43–50.
48. Dwyer M.J., McAllister M., Evernden D.W. Comparison of the tractive performance of a tractor driving wheel during its first and second pass in the same track. J Terramechanics 1977;14:1–10.
49. Dwyer M.J., Pearson G. A field comparison of the tractive performance of two- and four- wheel drive tractors. J Agrc Eng Res 1976;21:77–85.
50. Dwyer M.J. Predicting tractive performance. In: Proceedings of the int conf on soil dynamics, Auburn, Alabama, vol. 4; 1985. p. 679–92.

51. Dwyer M.J. Prediction of draw bar test performance. *J Terramechanics* 1987;24:169–77.
52. Dwyer M.J. The tractive performance of wheeled vehicles. *J Terramechanics* 1984;21:19–34.
53. Dwyer M.J. Tractive performance of a wide, low-pressure tire compared with conventional tractor drive tires. *J Terramechanics* 1987;24:227–34.
54. Ekinci S., Carman K., Tasyurek M., and Mirik M. “Relationship between Deflection and Contact Area of Drive Tire,” *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, vol. 4, no. 3, pp. 179-182 (2016)
55. Elwaleed. A. Effect of inflation pressure on motion resistance ratio of a high-lug agricultural tyre. *Journal of Terramechanics*, Vol. 43 No. 2.2006. pp. 69-84.
56. Evans M.D., Clark R. L, Manor G. A traction prediction and ballast selection model. ASAE Paper #89-1054. St. Joseph (MI) 49085: ASAE; 1989.
57. Evans M.D, Clark R. L, Manor G. An improved traction model for ballast selection. *Trans ASAE* 1991;34(3):773–80.
58. Fervers C.W. Improved FEM simulation model for tire-soil simulation. *J Terramechanics* 2004;41:87–100.
59. Foltz R.B., Burroughs E.R. (1991): A test of normal tire pressure and reduced tire pressure on forest roads: Sedimentation effects. In: Stokes B.J., Rawlins C.L. (eds): *Proceedings of the Forestry and Environment Engineering Solutions*, St. Joseph, June 5–6, 1991: 103–112.
60. Freitag D.R. A dimensional analysis of the performance of pneumatic tires on clay. *J Terramechanics* 1966;3:51–68.
61. Freitag D.R. Soil dynamics as related to traction and transport systems. In: *Proceedings of the int conf on soil dynamics*, Auburn, Alabama, vol. 4, p. 605–629; 1985.
62. Freitag, D.R. 1968. Penetration Tests for Soil Measurements. Miscellaneous Paper 4 960. Vicksburg, MS: US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station.
63. Freitag, D.R. 1968. Penetration tests for soil measurements. *Transactions of the ASAE* 11(6): 750–753.

64. Freitag, D.R., Smith, M. E., 1966, "Centerline Deflection of Pneumatic Tire Moving in Dry Sand," *Journal of Terramechanics*, 3(1).
65. Fujimoto Y. Performance of elastic wheels on yielding cohesive soils. *J Terramechanics* 1977;14:191–210.
66. Garbari F. Rolling resistance of wheeled vehicles on deformable terrain. *J Terramechanics* 1964;1:7–30.
67. Garber M, Shwartzman M. Agriculture tracked vehicle-soil interaction under uneven contact pressure conditions. *J Terramechanics* 1984;21:261–7.
68. Garber M, Wolf D. Track–soil interaction for maximum tractive effort. *J Agric Eng Res* 1984;29:191–8.
69. Garciano L.O., Upadhyaya S.K., and Jones R.A. Measurement of soil parameters useful in predicting tractive ability of off-road vehicles using an instrumented portable device. *J Terramech* 2010; 47: 295–305
70. Gee-Clough D. Ground drive equipment and aids to extend traffic ability limits and minimize soil structural damage. In: A paper presented at the autumn national conference of the inst of agr eng marks tey, Essex; 1977.
71. Gee-Clough D. The effect of wheel width on rolling resistance of rigid wheels in sand. *J Terramechanics* 1978;15:161–84.
72. Gee-Clough D. The special problem of wet land traction and flotation. *J Agric Eng Res* 1985;32:279–88.
73. Grecenko A. Slip and drift of the wheel with tyre on soft ground. In *Proceedings of 3rd ISTVS International Conference*, volume II, pages 76–95, Essen, Germany, 1969
74. Grecenko A. The slip and drift model of a wheel with tyre compared to some other attempts in this field. *Journal of Terramechanics*, 29(6):599–604, 1992.
75. Grecenko A.. Thrust and slip of a low-pressure tire on compressible ground by the compression-sliding approach. *Journal of Terramechanics*, 47(4):249–259, 2010.
76. Grisso R.D., Al-Hamed S.A., Taylor R.K., Zoz F.M. Demonstrating tractor performance trends using lotus templates. *Appl Eng Agric* 1992;8(6):733–8.

77. Hanamoto B. And Jebe E. H. Size effects in the measurement of soil strength parameters. Report, Army Tank-Automotive Command- Warren, MI, 1963.
78. Hayes J.C, Ligion J.T. Traction prediction using soil physical properties. Trans ASAE 1981;24:1420–5.
79. Hetherington J.G. The applicability of the MMP concept in specifying off-road mobility for wheeled and tracked vehicles. Journal of Terramechanics 38(2) 2001
80. Hetherington J.G., White J.N. : An investigation of pressure under wheeled vehicles. Journal of Terramechanics 39(2) 2002
81. Hetherington J.G, Littleton I. The rolling resistance of towed, rigid wheels in sand. J Terramechanics 1978;15:95–105.
82. Hrubel, M., Kraynyk, L., Mikhalieva, M., Zalyпка, V., Manziak, M., Khoma, V., Lanets, O., Ruban, D., Andriienko, A., & Kokhan, V. Improving a methodology for estimating the cross-country ability of all-wheel-drive vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. №2(128). P. 64–72.
83. Janoshi Z, Hanamoto B. An analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicles in deformable soils. In: 1st International conference on the mechanics of soil–vehicle systems. Paper No. 41; 1961.
84. Janosi Z, Hanamoto B. Analysis of the pull versus slip relationship for track laying vehicles. Report no. 69, Land Locomotion Laboratory, Michigan; 1961.
85. Jokai R., Webb D. (2001): Mobility Assessment of a Tractor/ Semi-trailer on Sand Roads. Vancouver, Forest Engineering Research Institute of Canada: 4.
86. Kaczmarek R.W. (1984): Central tire inflation systems (CTIS) – a means to enhance vehicle mobility. In: Proceedings of the 8th International Conference of the International Society for Terrain-vehicle Systems, Cambridge, June 1, 1984: 1255–1271.
87. Keller T. and Lamande M. Challenges in the development of analytical soil compaction models. Soil and Tillage Research, 111(1):54–64, 2010
88. Kennedy, J. G., and Rush E. S. 1968. Trafficability of soils; development of revised mobility index formula for self-propelled wheeled vehicles in fine-grained soils. Technical Memorandum 3-240, Eighteenth Supplement. Vicksburg, MS: US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station.

89. Khalid M, Smith J.L. Predicting tractor performance of four wheel drive tractors. ASAE Paper # 81-1538. St. Joseph (MI) 49085: ASAE; 1981.
90. Kim K.U., Shin B.S. Modelling motion resistance of rigid wheels. *J Terramechanics* 1985;22:225–36.
91. Kim J-T, Im D-U, Choi H-J, Oh J-W, Park Y-J. Development and Performance Evaluation of a Bevameter for Measuring Soil Strength. *Sensors*. 2021; 21(4):1541(2021)
92. Knuth M. A., Johnson J., Hopkins M., Sullivan R. and Moore J.. Discrete element modeling of a mars exploration rover wheel in granular material. *Journal of Terramechanics*, 49(1):27–36, 2012.
93. Kogure K, Ohira Y, Yamaguchi H. Prediction of sinkage and motion resistance of a tracked vehicle using plate penetration test. *J Terramechanics* 1983;21:35–43.
94. Koutny F. *Geometry and Mechanics of Pneumatic Tires*. Zlin, 2007. 139 p
95. Kumar, A., Chen, Y., Sadek, M.A.A., Rahman, S. Soil cone index in relation to soil texture, moisture content, and bulk density for no-tillage and conventional tillage. *Agric. Eng. Int. CIGR J.* 2012,14, 26–37
96. Larminie J.C. Soft-ground performance of military vehicles. *International Defence Review* 4/1988
97. Larminie J.C. Modifications to the mean maximum pressure system. *Journal of Terramechanics*, 1992, 29 (2).
98. Larminie, J. C. (1988). Standards for mobility requirements of military vehicles. *Journal of Terramechanics*, 25(3), 171–189. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/journal/00224898/25/3>
99. Liu C. and Wong J. Numerical simulations of tire-soil interaction based on critical state soil mechanics. *J. of Terramechanics*, 33(5):209–221, 1996
100. Liu K, Benetti M, Sozzi M, Gasparini F, Sartori L. Soil Compaction under Different Traction Resistance Conditions—A Case Study in North Italy. *Agriculture*. 2022; 12(11). <https://doi.org/10.3390/agriculture12111954>

101. Lyasko M. Slip sinkage effect in soil-vehicle mechanics. *Journal of Terramechanics*, 47:21–31, 2010.
102. Lyasko M. Multi-pass effect on off-road vehicle tractive performance. *Journal of Terramechanics*, 47(5):275–294, 2010.
103. Lyasko M. The determination of deflection and contact characteristics of a pneumatic tire on a rigid surface. *Journal of Terramechanics*, 31(4):239–246, 1994
104. Maclaurin F.B. The use of mobility numbers to describe in-field tractive performance of pneumatic tires. In: *Proceedings of the 10th int conf of the ISTVS, Kobe, Japan*. vol. 1; 1990. p. 177–86.
105. MacLaurin, E. (1997). The use of mobility numbers to predict the tractive performance of wheeled and tracked vehicles in soft cohesive soils. *Proceedings of the 7th European ISTVS Conference, Ferrara, Italy*, 391–398. Retrieved from www.gbv.de/dms/tib-ub-hannover/248927361.pdf
106. Martin A.M., Owende P.M.O., O'Mahony M.J., Ward S.M. (1999): Estimation of the serviceability of forest access roads. *International Journal of Forest Engineering*, 10: 55–61.
107. Marušiak M., Zemánek T., Neruda J., Nevrkla P. (2024): Calculation and operational assessment of □ tyre contact areas in □ the tractor-and-trailer unit. *Journal of □ Forest Science*, □70: □144–159
108. McAllister M. Reduction in the rolling resistance of tires for trailed agricultural machinery. *J Agric Eng Res* 1983;28:127–37.
109. McRae J.L. Theory of a towed wheel in soil. *J Terramechanics* 1964;1:31–53.
110. Melzer KJ. Dont forget the update. *J Terramechanics* 1989;26:287–8.
111. Melzer KJ. Possibilities of evaluating the traction of tires for off-road transportation devices. *J Terramechanics* 1984;21:309–33.
112. Meirion-Griffith G. and Spenko M. A modified pressure-sinkage model for small, rigid wheels on deformable terrains. *Journal of Terramechanics*, 48(2):149–155, 2011.

113. Meirion-Griffith G. and Spenko M. A pressure-sinkage model for small-diameter wheels on compactive, deformable terrain. *Journal of Terramechanics*, 50:37–44, 2012.
114. Moore T.L., Sowa R. (1997): Variable tire pressure technology: Reducing transportation costs and protecting forest ecosystems. *TR News No. 189*: 26–27.
115. Munro R., MacCulloch F. (2008): Tire Pressure Control on Timber Haulage Vehicles: Some Observations on a Trial in Highland, Scotland. Luleå, The Swedish Road Administration Northern Region: 74.
116. Murillo-Soto F, Smith JL. Push-pull characteristics of the 4WD tractor. ASAE paper # 78-1041. St. Joseph (MI) 49085: ASAE; 1978.
117. Muro T. Tractive performance of a bulldozer running on weak ground. *J Terramechanics* 1989;26:249–73.
118. Mussel U, Shmuleivch I, Wolf D. The effect of dynamically varying velocity on wheel traction. In: Presented at the 1992 international summer meeting, Paper No. 921013. 2950 Niles Rd., St. Joseph (MI) 49085-9659 USA: American Society of Agricultural Engineers; 1992.
119. Nadykto, V., Horetska, I., Glowacki, S. et al. Determination of the contact patch length in tractor tire–soil interaction. *Sci Rep* 16, 8520 (2026). <https://doi.org/10.1038/s41598-026-37868-2>
120. Nakashima H, Tanaka T, Yamazaki M. Finite element analysis of soil-lug interaction. In: Proceedings of the 10th int conf of the ISTVS, Kobe, Japan. vol. 1; 1990. p. 277–8.
121. Nakashima H. and Oida A. Algorithm and implementation of soil-tire contact analysis code based on dynamic finite element method. *Journal of Terramechanics*, 41:127–137, April-July 2004.
122. Nakashima H., Fujiib H., Oida A., Momozuc M., Kawase Y., Kanamori H., Aokie S., and Yokoyama T. Parametric analysis of lugged wheel performance for a lunar micro rover by means of DEM. *Journal of Terramechanics*, 44(2):153–162, April 2007.

123. Nuttall, C. J., Jr., C. W. Wilson, and R. A. Werner. 1966. One-pass performance of vehicles on fine-grained soils. Contract Report 3- 152. Vicksburg, MS: US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station.
124. Ogorkiewicz R.M. : Weighing up the infantry's armored vehicle options. *International Defence Review* 3/1999
125. Oida S., Seta E., Heguri H., and Kato K. Soil/tire interaction analysis using fem and fvm. *Tire Science and Technology*, 33(1):38–62, January 2005.
126. Owende P.M.O., Hartma A.M., Ward S.M., Gilchrist M.D., O'Mahony M.J. (2001): Minimizing distress on flexible pavements using variable tire pressure. *Journal of Transportation Engineering*, 127: 254–262.
127. Owende P.M.O., Hartma A.M., Ward S.M., Gilchrist M.D., O'Mahony M.J. (2001): Minimizing distress on flexible pavements using variable tire pressure. *Journal of Transportation Engineering*, 127: 254–262.
128. Pacejka H.B. and Bakker E. The magic formula tyre model. *Vehicle system dynamics*, 21(51):1–18, 1992
129. Pacejka H.B. *Tire and vehicle dynamics*. SAE International, Warrendale, PA, 2nd edition, 2006.
130. Perdok U.D. A prediction model for the selection of tires for towed vehicles on tilled soil. *J Agric Eng Res* 1978;23:369–83.
131. Plakett CW. A review of force prediction methods for off-road wheels. *J Agric Eng Res* 1985;31:1–29.
132. Pletts T. (2006): A literature overview of central tyre inflation systems. [MSc Thesis.] Pietermaritzburg, University of KwaZulu-Natal: 25.
133. Powell B., Brunette B. (1991): Reduced tire inflation pressure – a solution for marginal-quality road construction rock in southern Alaska. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Low-volume Roads*, Raleigh, May 19–23, 1991: 329–334.
134. Priddy, J. D. 1999. Improving the traction prediction capabilities in the NATO reference mobility model (NRMM). Technical Report GL-99-8. Vicksburg, MS: US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station.

135. Priddy, J.D., E. S. Berney, IV, and J. F. Peters. 2012. Effect of near-surface hydrology on soil strength and mobility. Geological Society of London, Special Publications 362: 301-320.
136. Priddy, J.D. and Willoughby, W.E., 2006. Clarification of vehicle cone index with reference to mean maximum pressure. *J. Terramech.* 43 (2), 85-96.
137. Priddy, J.D., 1995. Stochastic vehicle mobility forecasts using the NATO Reference Mobility Model – Report 3, Database development for statistical analysis of the NRMM II cross-country traction empirical relationships. U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station. Technical Report GL-95-8.
138. Ptak W., Czarnecki J., Brennenstul M., Lejman K., & Małecka A. (2022). Evaluation of agriculture tires deformation using innovative 3D scanning method. *Agriculture*, 12(8), 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12081108>
139. Reece A.R., 1965, “Principles of Soil-Vehicle Mechanics”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Automobile Division, 180: pp. 45-66.
140. Rohani B., Baladi G.Y. 1981. Correlation of Mobility Cone Index with Fundamental Engineering Properties of Soil: Final Report. Washington, D.C.: GPO.
141. Roșca R., Cârlescu P., Țenu I., (2017), Comparative analysis of some tire deformation models used for the prediction of traction characteristics, *INMATEH Agricultural Engineering*, Vol. 53, No.3, pp. 151-158, Bucharest, Romania;
142. Rowland D. Tracked vehicle ground pressure and its effect on soft ground performance. Proceedings of the International ISTVS Conference, Stockholm 1971
143. Rowland D., Peel J.W. Soft ground performance prediction and assessment for wheeled and tracked vehicles. Institute of Mechanical Engineering, 1975, 205, 81.
144. Rowland, D., 1975. A review of vehicle design for soft ground operation. In: Proc. of the 5th International Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems, Detroit-Houghton, Michigan, U.S.A., Vol. I, pp. 179-219.
145. Rummer R, Ashmore C. Factors affecting the rolling resistance of rubber-tired skidders. ASAE Paper # 86-1611. St. Joseph (MI) 49085: ASAE; 1986.

146. Rula A.A. and Nuttall C.J. An analysis of ground mobility models. Technical Report AEWES-TR-M-71-4, Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg MS, 1971.
147. Sandu C., Khan A.K., Guthrie A.G., Els P.S., & Hamersma H.A. (2019). Review of terramechanics models and their applicability to real-time applications. *Journal of Terramechanics*, 81(2), 3-22. doi: 10.1016/j.jterra.2018.04.003.
148. Sandu C, Li L. On the impact of cargo weight, vehicle parameters, and terrain characteristics on the prediction of traction for off-road vehicles. *Journal of Terramechanics*. 2007;44:221-238. <https://doi.org/10.1007/s11044-006-9007-5>.
149. Sandu, C., Sandu, A., and Ahmadian, M. - "Modeling Multi body Dynamic Systems with Uncertainties. Part II: Numerical Applications," *Multi body System Dynamics*, Publisher: Springer Netherlands, ISSN: 1384-5640 (paper) 1573-272X (online), DOI: 10.1007/s11044-006-9008-4, Vol. 15, No. 3, pp. 241-262(22), April 2006, http://people.cs.vt.edu/~asandu/Deposit/Blanchard_Sandu_ISTVS_07.pdf, last accessed on 22.09.2011
150. Sandu C., Taylor B. P., Biggans J. S., and Ahmadian M. Building an infrastructure for indoor terramechanics studies: the development of a terramechanics rig at virginia tech. In *Proceedings of 16th ISTVS International Conference*, pages 177–185, Turin, Italy, 2008.
151. Sandu C., Worley M. E., and Morgan J. P. Experimental study on the mobility of lightweight vehicles on sand. In *Proceedings of 16th ISTVS International Conference*, pages 162–176, Turin, Italy, 2008.
152. Sandu, C., Worley*, M., and Morgan, J.B. - "Experimental Study on the Contact Patch Pressure and Sinkage Analysis of a Lightweight Vehicle on Sand," Paper No.JTERRA-S-09-00021, *Journal of Terramechanics*, http://arc.engin.umich.edu/rsrch/rsrch1_9.html, last accessed on 22.09.2011.
153. SANDU, C., E. PINTO, S. NARANJO, P. JAYAKUMAR, A. ANDONIAN, D. HUBBELL und B. ROSS. Off-Road Soft Soil Tire Model Development and Experimental Testing. In: *17th International Conference of the International Society for Terrain Vehicle Systems 2011*, 2011.

154. Saarilahti M.: Soil interaction model. Development of protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites. Quality of Life and Management of Living Resources Contract No. QLK5 1999-00991. Report No. 3, Helsinki 2002
155. Sharma A. K. and Pandey K. P. A review on contact area measurement of pneumatic tire on rigid and deformable surfaces. *Journal of terramechanics*, Vol. 33 No. 5 pp. 253- 264, (1996).
156. Sharma A. K. and Pandey K. P. The Deflection and Contact Area Characteristics of Some Agriculture Tyres with Zero Sinkage. *Journal of Terramechanics*, Vol.33, No.6.pp.293-299, (1996).
157. Sharma A.K., Pandey K.P. Matching tyre size to weight, speed and power available for maximizing pulling ability of agricultural tractors. *J Terramechanics* 2001;38:89–97.
158. Sharma A.K., Pandey K.P. Traction data analysis in reference to a unique zero condition. *J Terramechanics* 1998;5:179–88.
159. Sharma A.K. Drawbar performance prediction of agricultural tractors. Unpublished Ph.D. thesis. Kharagpur, India: Department of Agricultural and Food Engineering, Indian Institute of Technology; 1997.
160. Shoop S., Darnell I., and Kestler K. Analysis of tire models for rolling on a deformable substrate. *Tire Science and Technology*, 30(3):180–197, July 2002.
161. Shoop S., Kestler K., and Haehnel R. Finite element modeling of tires on snow. *Tire Science and Technology*, 34(1):2–37, March 2006.
162. Shoop S. Thawing soil strength measurements. *Journal of Terramechanics*, 1993, 30(6).
163. Schmid I. C. Interaction of vehicle and terrain results from 10 years research at IKK. *Journal of Terramechanics* 32(1) 1995
164. Schuring D. The mechanics of rigid wheels on soft ground. *J Terramechanics* 1964;1(2):5–21.
165. Self K.P., Summers J.D. Dynamic load and wheel-speed ratio effects on four- wheel drive tractive performance. ASAE Paper # 88-1516. St. Joseph (MI) 49085: ASAE; 1988.

166. Simonson R. (1993): Tire Deflection Influence on Rear-axle Torque. SAE Technical Paper 933029. Warrendale, Society of Automotive Engineers: 6.
167. Society of Automotive Engineers, 1967. Off-road vehicle mobility evaluation – SAE J939, SAE Recommended Practice.
168. Standard for Ground Vehicle Mobility. – Режим доступа: <https://www.semanticscholar.org/paper/Standard-for-Ground-Vehicle-Mobility-Baylot-Gates/7a6b27a8fb14341694553d985fcc5ba1741d599f>.
169. Stevens, M.T., Towne, B.W., Mason, G.L., Priddy, J.D., Osorio, J.E., and Barela, C.A., 2013. Procedures for one-pass vehicle cone index (VCI) determination for acquisition support. U.S. Army Corps of Engineers, ERDC/GSL SR-13-2.
170. Stuart E., Gililand E., Della-Moretta L. (1987): The use of central tire inflation on low-volume roads. In: Proceedings of the 4th International Conference on Low-volume Roads, Ithaca, Aug 16–20, 1987: 164–168
171. Sturos J.A., Brumm D.B., Lehto A. (1995): Performance of a Logging Truck with a Central Tire Inflation System. Research Paper NC-322. St. Paul, USDA Forest Service: 10.
172. Taylor D.J. (1987): National Central Tire Inflation Program – Boise National Forest Field Operation Tests. San Dimas, USDA Forest Service: 42.
173. Taylor D.J. (1988): National Central Tire Inflation Program – Olympic National Forest Field Operational Tests. San Dimas, USDA Forest Service: 30.
174. Tsitouridis G., 2019. Terramechanics and soil-wheel interactions for road vehicle applications. Loughborough University. <https://doi.org/10.26174/thesis.lboro.11893947.v1>.
175. Turnage G.W. Tire selection and performance prediction for off-road wheeled vehicle operations. In: Proceedings of the fourth int conf on terrain vehicle systems, vol. 1; 1972. p61.
176. Ungureanu N., Voicu G., Vlădu V., Biri S., S., Matache M. Inflation pressure and static load effects on contact characteristics at solid soil—tire interface. UPB Sci. Bull. Ser. D 2016,78, 253–264.

177. Upadhyaya S.K., Wulfsohn D.: Traction prediction for radial ply tyres. Proceedings of the 10th International ISTVS Conference, Kobe, Japan, 1990.
178. Upadhyaya S.K., Sime M., Raghuwanshi N., Adler B. Semi-empirical traction prediction equations based on relevant soil parameters. *J Terramech* 1997;34(3):141–54
179. Upadhyaya S.K., Wulfsohn D., Jubbal G. Traction prediction equations for radial ply tires. *J Terramech* 1989;26(2):149–75.
180. Upadhyaya S.K., Wulfsohn D., Mehlschau J. An instrumented device to obtain traction related parameters. *J Terramech* 1993;30(1):1–20.
181. Upadhyaya S.K., Wulfsohn D. Traction prediction using soil parameters obtained with an instrumented analog device. *J Terramech* 1993;30(2):85–100.
182. Vechinski C.R., Jonson C.E., Raper R.L. Evaluation of an empirical traction prediction for forestry tires. *J Terramechanics* 1998;35: 55–67.
183. Wang Z., Domier K.W. Prediction of drawbar performance for a tractor with dual tires. *Trans ASAE* 1989;32:1529–33.
184. White H., Sandu C., Mukherjee J., L’Afflitto A., Gorsich D. and Cole M. – “Tire Sinkage Measurement and Entry Angle Calculation using Video Cameras”, paper no. JTERRA- D-24-00065, *J. of Terramechanics*, on-line Oct. 7, 2024, Vol. 117, Feb. 1, 2025, pp.
185. Wills B.M.D., Barrett F.M., Shaw G.J. An investigation into the rolling resistance theories for towed rigid wheels. *J Terramechanics* 1965;2: 24–53.
186. Wismer R.D, Luth HJ. Off-road traction prediction for wheeled vehicles. *J Terramechanics* 1973;10:49–61.
187. Wismer R.D, Luth HJ. Off-road traction prediction for wheeled vehicles. *Trans ASAE* 1974;17(14):8–10.
188. Wolf D., Mussel U., Shmuleivch I. Wheel traction losses on hard soil surface. In: Presented at the 1992 international summer meeting, Paper No. 921013. 2950 Niles Rd., St. Joseph (MI) 49085-9659 USA: American Society of Agricultural Engineers; 1992.
189. Wong J.Y. Wheel-soil interaction. *Journal of Terramechanics*, 1984, 21 (2).

190. Wong J.Y. An improved method for predicting tracked vehicle performance. *J Terramechanics* 1984;21:35–43.
191. Wong J.Y. Computer aided analysis of the effects of design parameters on the performance of tracked vehicles. *J Terramechanics* 1986;23: 95–124.
192. Wong J.Y. On the study of wheel-soil interaction. *J Terramechanics* 1984;21:117–31.
193. Wong, J.Y. 1994. On the role of mean maximum pressure as an indicator of cross country mobility for tracked vehicles. *J. Terramech.* 31 (3), 197-213.
194. Wong J.Y. 2008. *Theory of Ground Vehicles*, 4th Edition. John Wiley, New Jersey, U.S.A.
195. Wong J.Y. 2010. *Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering*, 2nd Edition. Elsevier, Oxford, England.
196. Wong J.Y., Jayakumar P., Preston-Thomas J., 2018. Evaluation of the computer simulation model NTVPM for assessing military tracked vehicle cross-country performance. *Proc. Inst. Mech. Eng., Part D, J. Automobile Engineering*, DOI: 10.1177/0954407018765504.
197. Wong J.Y., Jayakumar P., Toma E., Preston-Thomas J., 2018. Comparison of simulation models NRMM and NTVPM for assessing military tracked vehicle cross country performance. *J. Terramech.* 80, 31-48.
198. Wong J.Y., Reece A. R. Prediction of rigid wheel performance based on analysis of soil-wheel stresses, Part I. Performance of driven rigid wheels. *Journal of Terramechanics*, 4(1):81–98, 1967.
199. Wong J.Y., Jayakumar P., Toma E. & Preston-Thomas J. A review of mobility metrics for next-generation vehicle mobility model. *J. Terramechanics*, 2020, 87, 11-20. doi:10.1016/j.jterra.2019.10.003
200. Wong J.Y. and Preston-Thomas J. On the characterization of the shear stress-displacement relationship of terrain. *Journal of Terramechanics*, 19(4):225–234, 1983.
201. Wong J.Y. and Reece A.R. Prediction of rigid wheel performance based on the analysis of soil-wheel stresses part I. performance of driven rigid wheels. *Journal of Terramechanics*, 4(1):81–98, 1967.

202. Wong J.Y. and Reece A. R. Prediction of rigid wheel performance based on analysis of soil-wheel stresses, Part II. Performance of towed rigid wheels. *Journal of Terramechanics*, 4(2):7–25, 1967.
203. Yadav, R., Raheman, H. Estimation of Tyre Deflection and Contact Area of Tubeless Tyre on Firm Surface for Traction Studies. *J. Inst. Eng. India Ser. A* 105, 281–293 (2024). <https://doi.org/10.1007/s40030-024-00789-2>
204. Yasui A. Field tests and theoretical analysis concerning the rolling resistance of track laying vehicle due to plastic deformation. *J Terramechanics* 1974;11:45–66.
205. Yong R.N., Fattah E.A. Tire flexibility and mobility on soft soils. *J Terramechanics* 1980;17:43–58.
206. Yong R.N., Fattah E.A., Skiadas N. *Vehicle traction mechanics*. Elsevier Pub.; 1984. 307p.
207. Yong R.N., Fattah E.A. Prediction of wheel–soil interaction and performance using the finite element method. *J Terramechanics* 1976;13(4):227–40.
208. Yong R.N., Youssef A.F., Mamlouk E.L. Soil deformation and slip relative to grouser shape and spacing. *J Terramechanics* 1978;15: 129–44.
209. Yong R.N. Application of finite element method for traction prediction. In: *Proceedings of the int conf on soil dynamics, Auburn, Alabama, vol. 4; 1985. p. 827–46.*
210. Yong R.N. Track-soil interaction. *J Terramechanics* 1984;21:133–52.
211. Zoz F.M., Grisso R.D. Traction and tractor performance. *ASAE distinguished lecture series. Tractor Design No. 27. St. Joseph (MI) 49085: ASAE; 2003. 46p*
212. Zoz F.M. Predicting tractor field performance (updated). *ASAE Paper # 87-1623. St. Joseph (MI) 49085: ASAE; 1987.*
213. Zoz F.M. Predicting tractor field performance. *Trans ASAE* 1972;15(2):249–55.
214. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
215. Аврунін, Г., Подригало, М., Подригало, Н., Мороз, І., & Поторока, А. (2024). Аналіз можливості застосування гідравлічної трансмісії з мотор-колесами

- для всюдихода NOMAD ATV. Автомобільний транспорт, (54), 15–24.
<https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2024.54.0.02>
216. Адамчук В.В., Булгаков В.М., Надикто В.Т., Кюрчев В.М., Камінський В.Ф. Дослідження умов доцільності застосування подвоєних або потроєних шин колісних енергетичних засобів. Вісник аграрної науки. 2022. №8 (833). С. 60-66.
<https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202208-07>
217. Антощенко Р. В., Антощенко В. В., Фабричнікова І. А., Сміцков Д. С., Кісь О. В. Визначення динаміки колеса мобільної машини. Український журнал прикладної економіки та техніки. 2023. Том 8. № 4. С. 115 – 120.
<https://doi.org/10.36887/2415-8453-2023-4-18>
218. Антощенко Р. В., Череватенко Г. І., Антощенко В. М., Скляр О. Г., Скляр Р. В. Дослідження впливу міжколісного диференціала на динамічні та тягово-енергетичні показники повнопривідного чотириколісного трактора. Український журнал прикладної економіки та техніки. 2025. Том 10. № 2. С. 322 – 327. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2025-2-62>
219. Антощенко Р. В., Череватенко Г. І., Задорожний В. П., Світличний О. В., Кусков М. А. Дослідження динаміки повнопривідної тягово-транспортної машини. Український журнал прикладної економіки та техніки. 2023. Том 8. № 4. С. 336 – 341. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2023-3-51>
220. Бабков В.Ф., Бируля А.К., Сиденко В.М. Проходимость колесных машин по грунту. -М.: Автотрансиздат, 1959. — 189 с
221. Барахтанов Л.В., Беляков Б.В., Кравец В.Н, Проходимость автомобиля. — И. Новгород: НГТУ, 1996. - 200 с.
222. Безбородова Г.Б. О направлениях научных исследований проходимости автомобилей // Изв. вузов. Машиностроение. — 1965. -№5. - С. 145-148
223. Булгаков В.М., Адамчук В.В., Надикто В.Т., Кюрчев В.М., Камінський В.Ф., Дубровіна О.О. Теоретичне дослідження умов максимально допустимого буксування рушіїв колісних енергетичних засобів. Вісник аграрної науки. 2022. №12 (837). С. 40-47. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202212-06>

224. Гмошинский В.Г. Проходимость зимних дорог автотранспортом // Труды совещания по проходимости колесных и гусеничных машин по целине и грунтовым дорогам. - М.: Изд-во АН СССР, 1950. - С. 175-194.
225. ГОСТ РВ 52048-2003 «Автомобили многоцелевого назначения. Параметры проходимости и методы их определения».
226. ГОСТ 22653–77 Автомобили. Параметры проходимости. Термины и определения. – Введ. 01.07.1978
227. Гребенщиков В.И. Исследование проходимости автомобиля по мягким грунтам // Автомобильная промышленность. - 1956. —№10. — С. 12-15.
228. Грубель М.Г. Оцінка тягово-швидкісних характеристик військової автомобільної техніки за умов руху бездоріжжям методами імітаційного моделювання / М.Г. Грубель, Л.В. Крайник, М.Ф. Боднар // Озброєння та військова техніка. – № 3(23). – 2019. – С. 46-53.
229. Грубель М. Г., Крайник Л. В., Хома В. В. Імітаційне моделювання руху колісної військової автомобільної техніки бездоріжжям та оцінка його адекватності. Автошляховик України. 2020. № 2. С. 21–28
230. Грубель М., Манзяк М., Хома В., Ланець О., Андрієнко А. Імітаційне моделювання мобільності колісної військової автомобільної техніки за умов руху бездоріжжям. Військово-технічний збірник НАСВ. 2023. №28. С. 10–17
231. Грубель М., Фтемов Ю., Хома В. Експериментальні дослідження параметрів опорної прохідності зразків колісної військової автомобільної техніки. Системи озброєння та військова техніка. 2019. № 4(60). С. 7-15.
232. Кошарный, Н.Ф. Влияние параметров рисунка протектора на сцепление шин с деформирующимся грунтом / Н.Ф. Кошарный // Конструкции автомобилей. – 1977. – Выпуск 1. – С. 37–44.
233. Кошарный, Н.Ф. Некоторые закономерности динамики взаимодействия колеса с грунтом / Н.Ф. Кошарный // Автомобильная промышленность. – 1977. – № 1. – С.16–23.

234. Кошарный, Н.Ф. Оценка несущей способности слабых оснований / Н.Ф. Кошарный // Автомобильные дороги и дорожное строительство. – 1978. – Выпуск 23. – С. 85–91.
235. Кошарный, Н.Ф. Технично-експлуатаційні властивості автомобілів високої проходимості / Н.Ф. Кошарний. – Киев: Вища школа, 1981. – 208 с.
236. Кюрчев В.М., Веселовська Н.Р., Бурлака С.А. Підвищення тягово-зчіпних характеристик енергетичного засобу при проведенні комбінованих операцій обробітку ґрунту. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. №1(120). С. 48-53. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2023-1-6>
237. Манзяк М., Хома В., Грубель М. Оцінка плавності руху колісної військової автомобільної техніки в умовах бездоріжжя. Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту: матеріали XI-ї Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції (м. Вінниця 13-14 квітня 2023 р.). Вінниця: ВНТУ, 2023. С. 221-224.
238. Манзяк М., Хома В., Грубель М., Крайник Т. Удосконалення методики оцінки плавності ходу для автомобіля підвищеної прохідності. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 2024. №1(22). С. 233-243.
239. Надикто В. Т., Кюрчев В. М., Погорілий С. П. Визначення впливу рівня енергонасиченості колісного трактора на силу опору його коченню. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2025. №15(2). С. 99-104. <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-12>
240. Подригало М.А., Кайдалов Р.О., Омельченко В.І. Оцінка коефіцієнта корисної дії колісного рушія автомобіля. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології, 2022. №21. С. 31-39.
241. Подригало М.А., Нікорчук А.І., Підвищення прохідності автомобілів та наземних роботизованих комплексів. Збірник наукових праць ДНДІ ВС ОВТ, 2025. № 1(23). С. 70-77.
242. Подригало М.А., Краснокутський В.М., Кашканов В.А., Ткаченко О. С., Янчик О. Г. Покращення тягового-швидкісних властивостей вдосконаленням методів вибору параметрів моторно-трансмісійної установки автомобіля. Вісник

машинобудування та транспорту. 2021. №1(13), С. 111–117.
<https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-13-1-111-117>

243. Ребров О. Ю. Наукове обґрунтування підвищення ефективності колісних рушіїв сільськогосподарських тракторів на енергоємних технологічних операціях обробітку ґрунту [Електронний ресурс] : дисертація доктора технічних наук; НТУ "ХПИ". – Харків, 2021. – 423 с.

244. Ребров О.Ю. Оціночний аналіз дії на ґрунт ходових систем колісних сільськогосподарських тракторів / О.Ю. Ребров, Б.І. Кальченко, М.Є. Якунін, В.А. Макаров, І.Г. Бучко, О.М. Реброва, О.В. Артюшенко, О.М. Леоненко // Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Сер. Автомобіле- і тракторобудування.– Харків: НТУ «ХПИ». – 2022. – № 1. – С. 36–43.

245. Ребров О.Ю., Малько М.М., А.О Реброва, М.Є. Якунін. Методика визначення раціональних типорозмірів шин для комплектування колісних сільськогосподарських тракторів. Харків: Вісник НТУ "ХПИ". Серія Автомобіле- та тракторобудування 2023 №1. С. 117 – 125.

246. Ребров О.Ю., Петренко О.Г. Формування методів визначення раціональних типорозмірів шин для комплектування колісних тракторів. Новітні технології – для захисту повітряного простору XXI міжнародна наукова конференція Харківського Національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба 09 – 10 квітня 2025 року Харків. С. 461.

247. Ребров А. Ю. Идентификация сельскохозяйственных тракторных шин численным методом / А. Ю. Ребров // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. Темат. вып.: Математическое моделирование в технике и технологиях. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2015. – № 6 (1115). – С. 114-121.

248. Хома В. Експериментальні дослідження впливу роздільного регулювання тиску в шинах на показники опорної прохідності автомобільної техніки. Вісник ЛНУП. Серія «Агроінженерні дослідження». 2025. №29. С. 64–69.

249. Хома В. Ефективність роздільного регулювання тиску в шинах з умов прохідності та мобільності руху бездоріжжям. Вісник ЛНУП. Серія «Агроінженерні дослідження». 2024. №27. С. 22–26.

250. Хома. В. Мобільність автомобіля в умовах бездоріжжя. Проблеми з транспортними потоками і напрями їх розв'язання: матеріали IV Всеукраїнської конференції (Львів, 25-26 березня 2021 р.). Львів: Галицька видавнича спілка, 2021. С. 111-112.

251. Хома В. Роздільне регулювання тиску в шинах повноприводних автомобілів. Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту: матеріали X-ї Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції (м. Вінниця 14-15 квітня 2022 р.) Вінниця: ВНТУ, 2022. С. 304-306.

252. Хома В., Крайник Л. Підвищення прохідності колісної автотехніки раціональним регулюванням тиску повітря в шинах. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції (Львів, 14 травня 2021 р.). Львів: НАСВ, 2021. С. 67.

253. Хома В., Крайник Л. Вплив регулювання тиску повітря в шинах на взаємодію з опорною поверхнею. Актуальні проблеми сучасної науки: теоретичні та практичні дослідження молодих учених: матеріали I-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції (м. Полтава 26-27 квітня 2023 р.) Полтава: ПДАУ, 2023. С. 73-75.

254. Худавердян Г.А., Хома В.В. Технологічні процеси обробітку ґрунту: комп'ютерне моделювання. *Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем*: матеріали III Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції (м. Рівне 19-20 жовтня 2022р.) Рівне: НУВГП, 2022. 301с. Електронне видання.

255. Худавердян Г., Хома В., Крайник Л. Імітаційне моделювання руху полем повноприводної колісної техніки у програмному середовищі MATLAB Simulink. *Вісник ЛНУП. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2023. №26. С. 164–170.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Таблиця А1 - Статистичні значення параметрів ґрунтових поверхонь, що за результатами аналізу характеризують деформацію та зчіпні властивості

№ з/п	Параметри, види і стани ОП	E , мПа	H_z , см	φ_0 , град	C_0 , мПа	CI , мПа	
1.	Зв'язні ґрунти						
	Глина:						
	тверда	>50,0	∞	18 – 22	0,05 – 0,1	>7,14	
	м'яка пластична	10 - 50	∞	11 – 18	0,02 – 0,05	1,43-7,14	
	текуча пластична	9,0 - 10,0	20 - 60	7 – 11	0,01 – 0,02	1,29-1,43	
	текуча	0,5 - 3,0	5 - 25	3 – 7	0,003 – 0,01	0,07-0,43	
	Суглинок:						
	твердий	>35,0	∞	21 – 25	0,03 – 0,06	>9	
	м'який пластичний	8,0 - 35,0	∞	16 – 21	0,015 – 0,03	1 - 9	
	текучий пластичний	3,0 - 8,0	20 - 70	12 – 16	0,008 – 0,015	0,4 - 1	
	текучий	0,5 - 3,0	5 - 20	8 – 12	0,004 – 0,008	0,3 – 0,4	
	Легкий суглинок:						
	твердий	>25,0	∞	24 – 28	0,02 – 0,05	>5,67	
	м'який пластичний	7,0 – 25,0	∞	19 – 24	0,01 – 0,02	0,9 – 5,67	
	текучий пластичний	2,0 – 7,0	20 - 80	16 – 19	0,005 – 0,01	0,4 – 0,9	
	текучий	0,5 – 2,0	5 - 20	12 – 16	<0,005	0,3 – 0,4	
	2.	Незв'язні ґрунти					
		Пісок: Для глибини колії 0,1 – 0,2 м.					
		неущільнений	2,0 – 5,0	-	30 – 38	<0,002	0,013 – 0,03
ущільнений		10,0	-	36 – 43	0,002 – 0,008	0,74-1,2	
3.	Заболочені ґрунти						
	Торф'яні:						
	неущільнені	0,2 - 0,5	-	$\tan \varphi_0$ 0,1–0,2	0,01 – 0,02	0,18-0,44	
	осушені, або ущільнені	0,5 - 1,0	-	0,2–0,4	>0,02	0,44-0,88	
Сапропелеві, намулові (ілісті) неущільнені	0,1 - 0,2	-	0,01	<0,01	0,09-0,18		

ДОДАТОК Б

Технічні характеристики типових повноприводних КТЗ, що експлуатуються в
Україні

Таблиця Б1 – Технічні характеристики шасі модельованих КТЗ

Модель КТЗ	Лобова площа F, м ²	К-нт обтічно сті c _x	Колісна формула	Повна маса m, кг	Розподіл повної маси на осі			
					m ₁ , кг	m ₂ , кг	m ₃ , кг	m ₄ , кг
УАЗ-469	3.40	0.60	4x4	2105	1001	1104	-	-
ВАЗ-2121	2.20	0.54	4x4	1610	780	830	-	-
ГАЗ-66	5.16	0.70	4x4	5970	2930	3040	-	-
ЗіЛ 131	5.10	0.80	6x4	10184	3060	3562	3562	-
УРАЛ-4320	6.20	0.85	6x6	15520	4850	5335	5335	-
КамАЗ-4310	6.90	1.10	6x6	15204	5020	5092	5092	-
МАЗ-5316	8.44	1.20	4x4	11650	7150	4500	-	-
КрАЗ-5233	7.10	1.10	4x4	17000	7300	9700	-	-
КрАЗ-6322	7.10	1.10	6x6	23000	7000	8000	8000	-
МАЗ-6317	8.44	1.20	6x6	25150	7150	9000	9000	-
БТР-4	8.44	1.20	8x8	22000	5500	5500	5500	5500

Таблиця Б2 - Передавальні числа КПП та ГП модельованих КТЗ

Модель КТЗ	Передавальні числа КПП									ГП
	u ₁	u ₂	u ₃	u ₄	u ₅	u ₆	u ₇	u ₈	u ₉	
УАЗ-469	3.78	2.60	1.55	1.00	-	-	-	-	-	4.45
ВАЗ-2121	3.67	2.10	1.36	1.00	-	-	-	-	-	3.90
ГАЗ-66	6.48	3.09	1.71	1.00	-	-	-	-	-	6.83
ЗіЛ 131	7.44	4.10	2.29	1.47	1.00	-	-	-	-	7.32
УРАЛ-4320	5.62	2.89	1.64	1.00	0.72	-	-	-	-	7.32
КамАЗ-4310	7.82	4.03	2.50	1.53	1.00	-	-	-	-	7.22
МАЗ-5316	12.24	6.88	4.86	3.50	2.74	1.97	1.39	1.00	0.78	7.00
КрАЗ-5233	13.96	7.47	5.28	3.82	2.79	1.95	1.38	1.00	0.73	8.17
КрАЗ-6322	13.96	7.47	5.28	3.82	2.79	1.95	1.38	1.00	0.73	8.17
МАЗ-6317	12.24	6.88	4.86	3.50	2.74	1.97	1.39	1.00	0.78	7.00
БТР-4	7.15	3.03	1.92	1.40	1.00	-	-	-	-	7.00

Таблиця Б3 – Технічні характеристики шин модельованих КТЗ

Модель КТЗ	Типорозмір шини	Ширина профілю В, м	Висота профілю Н, м	Радіус кочення r_k , м	Мін. тиск p_0 , кПа	Макс. тиск p_w , кПа
УАЗ-469	235/75R15	0.235	0.176	0.366	50	200
ВАЗ-2121	175/80R16	0.175	0.140	0.343	50	200
ГАЗ-66	320/80R18	0.320	0.256	0.484	100	300
ЗіЛ 131	335/80R20	0.335	0.268	0.571	100	350
УРАЛ-4320	425/85R20	0.425	0.361	0.627	100	400
КамАЗ-4310	425/85R20	0.425	0.361	0.627	100	400
МАЗ-5316	550/70R21	0.550	0.412	0.675	150	550
КрАЗ-5233	530/70R21	0.530	0.370	0.637	150	550
КрАЗ-6322	530/70R21	0.530	0.370	0.637	150	550
МАЗ-6317	550/70R21	0.550	0.412	0.675	150	550
БТР-4	365/80R20	0.365	0.292	0.546	150	450

ДОДАТОК В

Зовнішні швидкісні характеристики деяких типових ДВЗ, що використовуються в імітаційному моделюванні

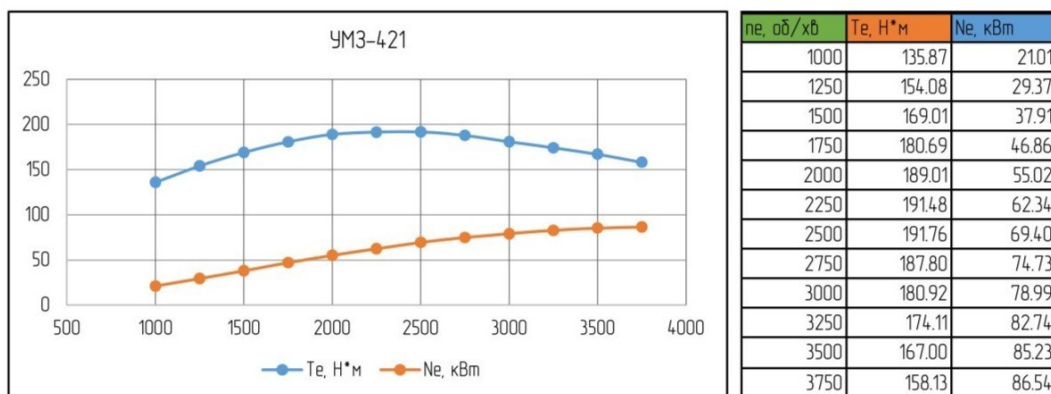


Рисунок В1 - Зовнішня швидкісна характеристика двигуна УМЗ-421

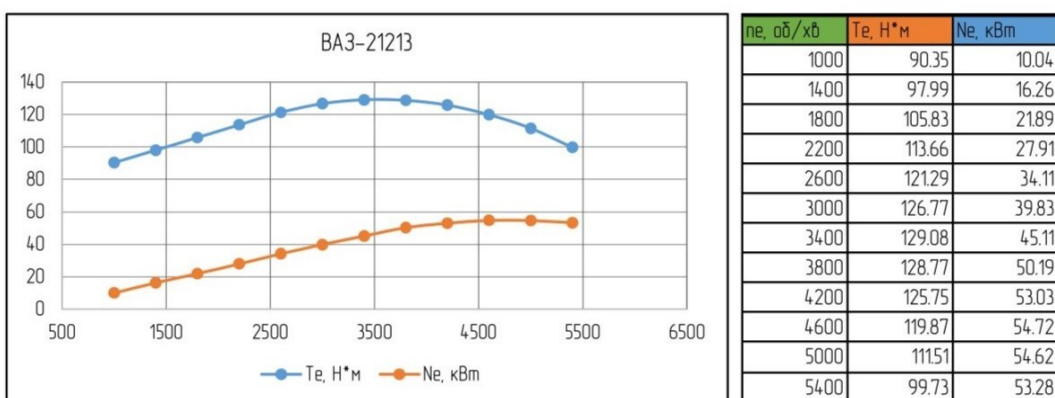


Рисунок В2 - Зовнішня швидкісна характеристика двигуна ВАЗ-21213

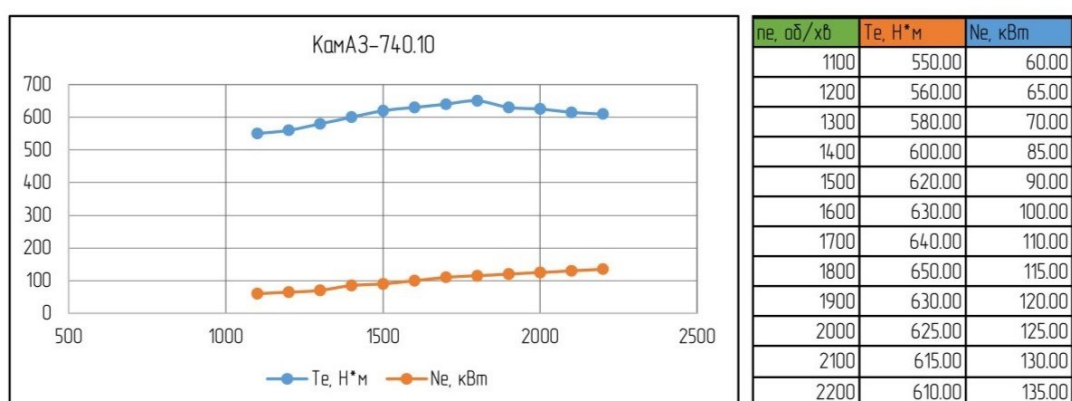


Рисунок В3 - Зовнішня швидкісна характеристика двигуна КамАЗ-740

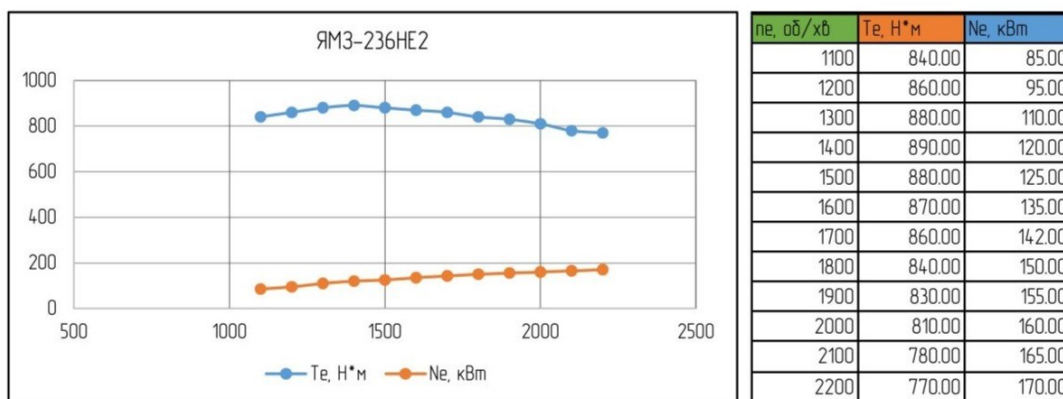


Рисунок В4- Зовнішня швидкісна характеристика двигуна ЯМЗ-236НЕ

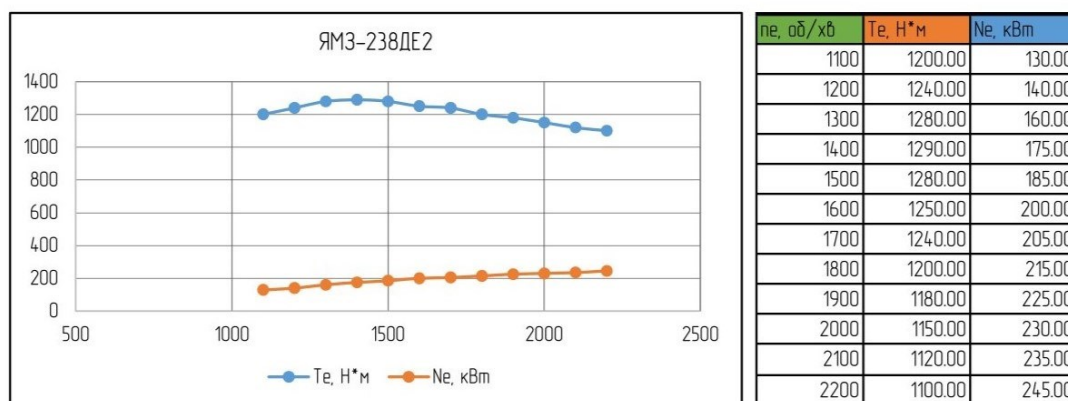


Рисунок В5- Зовнішня швидкісна характеристика двигуна ЯМЗ-238ДЕ

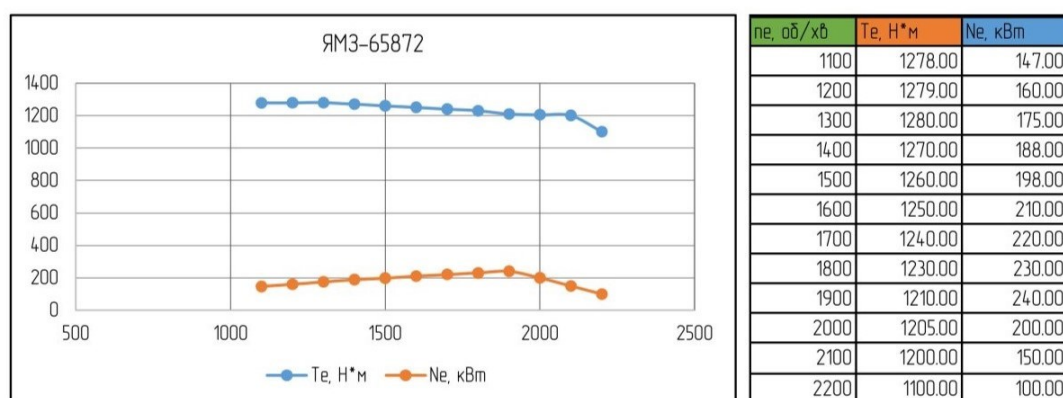


Рисунок В6- Зовнішня швидкісна характеристика двигуна ЯМЗ-65872

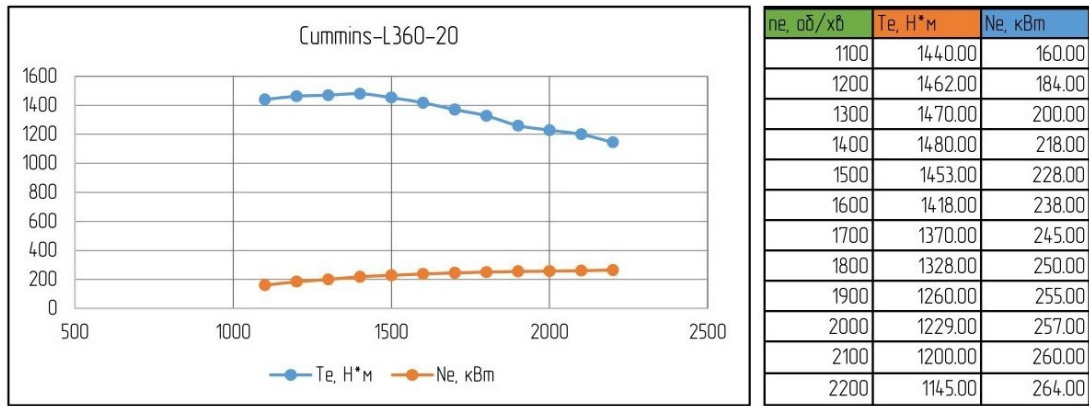


Рисунок В7- Зовнішня швидкісна характеристика двигуна Cummins L360-20

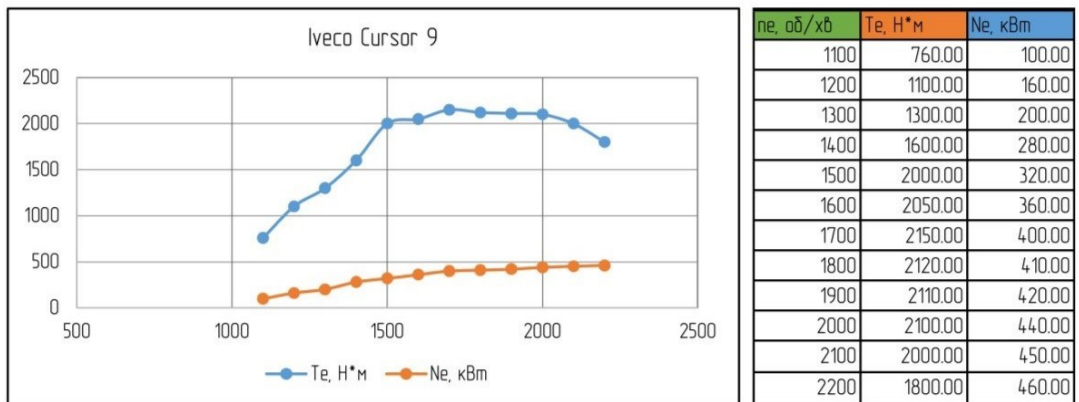


Рисунок В8- Зовнішня швидкісна характеристика двигуна Iveco Cursor 9

ДОДАТОК Г

Наказ про підготовку на проведення експериментальних досліджень на території
МЦМБ

МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ

ВИТЯГ ІЗ НАКАЗУ

НАЧАЛЬНИКА НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ СУХОПУТНИХ ВІЙСЬК
ІМЕНІ ГЕТЬМАНА ПЕТРА САГАЙДАЧНОГО30.10.2019

м. Львів

№735АД

Про організацію підготовки та
проведення експериментальних
досліджень

Відповідно до Плану наукової і науково-технічної діяльності Національної академії сухопутних військ на 2019 рік, індивідуального плану наукової роботи докторанта штатного науково-організаційного відділу підполковника Грубеля М.Г. та індивідуального плану роботи ад'юнкта штатного науково-організаційного відділу підполковника Бахмата М.В. наказую:

1. Начальнику науково-організаційного відділу в період з 01.11 по 20.12.2019 організувати виконання експериментальних досліджень прохідності автомобілів КРАЗ-5233 та КамАЗ-4310 і супутні експериментальні дослідження макетного зразка радіолокаційного вимірювача параметрів руху.

2. Для організації підготовки і проведення експериментальних досліджень створити робочу групу в складі:

керівник групи – докторант штатний науково-організаційного відділу підполковник Грубель Михайло Григорович;

члени групи:

науковий керівник експериментальних досліджень – голова правління ВАТ “Укравтобспром” доктор технічних наук, професор Крайник Любомир Васильович (за згодою);

начальник науково-організаційного відділу підполковник Нанівський Роман Антонович;

провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу (ракетних військ та артилерії) Наукового центру Сухопутних військ працівник ЗС України Бударецький Юрій Іванович;

науковий співробітник науково-дослідного відділу (ракетних військ та артилерії) Наукового центру Сухопутних військ працівник ЗС України

Сірий Юрій Іванович;

інженер-конструктор ВАТ “Укравтобуспром” Хома Віталій Васильович (за згодою);

ад’юнкт штатний науково-організаційного відділу підполковник Бахмат Максим Вікторович.

3. Керівнику робочої групи:

експериментальні дослідження прохідності автомобілів провести відповідно до “Типової програми і методів випробувань повнопривідних автомобілів на прохідність” та здійснити реєстрацію спектрів флуктуацій доплерівських сигналів, що відбиваються від дороги;

забезпечити проведення експериментальних досліджень шляхом додаткового встановлення вимірювальної апаратури з виключенням внесення змін у конструкцію досліджуваного ОВТ;

під час проведення випробувань та експериментальних досліджень забезпечити дотримання вимог заходів безпеки;

за результатом проведеної роботи оформити звіт та надати на затвердження заступнику начальника академії сухопутних військ з наукової роботи в термін до 30.12.2019 року.

4. Заступнику начальника академії з тилу – начальнику тилу виділити необхідну кількість паливно-мастильних матеріалів для проведення експериментальних досліджень, згідно заявки керівника робочої групи.

5. Командиру військової частини А4150

у період з 01.11 по 20.12.2019 встановленим порядком організувати пропуск на територію полігону робочої групи для проведення експериментальних досліджень.

6. Командиру військової частини А2615:

у період з 01.11 по 20.12.2019 спланувати та виділити автомобілі КРАЗ-5233 – 1 од. та КамАЗ-4310 – 1 од. для виконання експериментальних досліджень прохідності, відповідно до поданих заявок.

7. Контроль за виконанням наказу покласти на заступника начальника академії сухопутних військ з наукової роботи.

8. Наказ довести до особового складу, що їх стосується.

Начальник Національної академії
сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного

генерал-лейтенант

Згідно з оригіналом:

Начальник відділу персоналу та стройового

підполковник

П.ТКАЧУК

С.І. АДЕНЮК



Виконав: М.БАХМАТ, 0635656841

ДОДАТОК Г

Протокол випробувань фізико-механічних властивостей зразків ґрунтів
відібраних на території МЦМБ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ПКО "Політехніка"

Національного університету

"Львівська політехніка"

"_____" Я. ТИХАНСЬКИЙ

"_____" 2019 року

Протокол випробувань

фізико-механічних властивостей зразків ґрунтів (опорних поверхонь) для експериментальних досліджень прохідності колісної військової автомобільної техніки (ВАТ) КраЗ-5233 і КамАЗ-4310 на Міжнародному центрі миротворчості та безпеки (МЦМБ) Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного.

№ з/п	Показники	Ділянка №1	Ділянка №2	Ділянка №3
1.	Природна вологість, %	15,3	14,8	23,5
2.	Густина ґрунту непорушеної структури, г/см ³	1,76	1,74	1,88
3.	Густина скелету ґрунту, г/см ³	2,67	2,68	2,70
4.	Густина сухого ґрунту, г/см ³	1,52	1,51	1,52
5.	Пористість, %	43,0	43,6	43,7
6.	Коефіцієнт пористості	0,75	0,774	0,78
7.	Число пластичності $F=W_T-W_p$, %	26-22=4%	26-22=4%	33-24=9%
8.	Ступінь вологості	0,54	0,51	0,81
9.	Консистенція (показник текучості)	-1,68	-1,80	-0,05
10.	Зчеплення, $\frac{\text{кг/см}^2}{\text{кПа}}$	0,15/15,0	0,15/15,0	0,25/25,0
11.	Кут внутрішнього тертя, град.	25°	25°	23°
12.	Тип ґрунту згідно ДСТУ Б В.2.1-2-96 «ґрунти. Класифікація»	Супісок піщанистий	Супісок піщанистий	Суглинок легкий піщанистий

Завідувач кафедри автомобільних доріг та мостів, Інституту будівництва та інженерії довкілля, НУ «Львівська політехніка»,
д.т.н., професор

С. СОЛОДКИЙ

Дослідження виконав:

Доцент кафедри автомобільних доріг та мостів, Інституту будівництва та інженерії довкілля НУ «Львівська політехніка»,
к.т.н., доцент

І. ДУМИЧ

ДОДАТОК Д

Протокол зважування УАЗ-469

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «А В Т О Т Р А Н С – Д І К»

Україна 79069 м. Львів, вул. Шевченка Т., буд. 317-Т, Поштова адреса: 79069 м. Львів А/С 8296 тел./ф. 2911818
Р/р 26001053820684 в ПАТ КБ «Приват Банк» МФО 325321 Ідентифікаційний код № 31978340
Свідоцтво про реєстрацію п.л. ПДВ 18168802 ІПН 319783413076
E-mail: avtodik@ukr.net

Випробувальна лабораторія ТЗОВ «Автотранс-ДІК»
Атестат про акредитацію № 201506 від 27.11.2022р.

« 24 » Листопада 2025р.

м. Львів

Результати зважування транспортного засобу при динамічному навантаженні:

- 1. Відомості про якість та точність устаткування для зважування :**
Універсальний стенд Unimetal RHE-30/10, розширена невизначеність вимірювань $\leq 0,91\%$.
Діапазон вимірювання 0-18000кг на 1 вісь.
Свідоцтво про калібрування №2-0959-2025 від 24.05.2025 р.

2. Відомості про транспортний засіб :

марка ТЗ УАЗ - 469
держ. номер 7463 E9 категорія ТЗ Легковий автомобіль
номер шасі (рама) 614978
власник ТЗ в/ч А4150

3. Результати зважування по осях в кг:

1	2	3	4	5	6
1004	1101	---	---	---	---

Кількість палива в баку : 15

Число запасних шин:

1 шт.

Наявність підйомної осі : - -

Число людей у транспортному засобі: 3

Маса транспортного засобу: **2105кг.**

Керівник випробувальної лабораторії
ТЗОВ «Автотранс-ДІК»



Б.М.ДУЛЬКА

Перелік підтверджуючих документів на право проведення зважування додається в кількості 2 аркушів, які є невід'ємною частиною даної довідки.

*** Довідка про результати зважування може пред'являтися Власником ТЗ у всі державні інстанції України як доказова база для вирішення спірних питань

ДОДАТОК Е

Акти впровадження результатів досліджень



«ЗАВОД ЕЛЕКТРОНМАШ»
ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ «Завод
Електронмаш»



Будзан В.І.
2026 року

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

в ТОВ «Завод Електронмаш» наукових результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня PhD зі спеціальності 133 - Галузеве машинобудування

Хоми Віталія Васильовича

на тему: «Підвищення прохідності повноприводних автомобілів роздільним регулювання тиску у шинах»

Комісія у складі: директора Будзана В.І., генерального конструктора Сидя В.В. та головного технолога Яхимця Р.М. склала цей акт і підтверджує, що основні положення дисертаційної роботи Хоми В.В. вирішують проблему, пов'язану із забезпеченням ефективності використання автомобілів багатоцільового призначення, а саме підвищенням прохідності під час руху в умовах бездоріжжя.

Отримані результати мають наукову і практичну цінність, мають суттєве значення для покращення експлуатаційних властивостей повнопривідних автомобілів і забезпечення ефективності їх використання та реалізовані при виконанні науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт по проектах ЕМ-С320 та ЕМ-С440.

За результатами роботи автором:

– викладено нове науково обґрунтоване технічне рішення підвищення опорної прохідності автомобілів багатоцільового призначення за рахунок децентралізації регулювання тиску повітря в шинах;

– обґрунтовано раціональні значення та розроблено систему регулювання тиску повітря в шинах коліс автомобілів багатоцільового призначення.

Директор

Будзан В.І.

Заст. Директора, генеральний конструктор

Сидь В.В.

Заст. Директора, головний технолог

Яхимець Р.М.

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Виконавчий директор ВАТ
 «Український інститут
 автобусо-тролейбусобудування»



Крайник Т.Л.
 2026 року

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

в Українському інституті автобусо-тролейбусобудування
 результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії
 зі спеціальності 133 - Галузеве машинобудування

Хоми Віталія Васильовича

на тему: «Підвищення прохідності повноприводних автомобілів роздільним
 регулювання тиску у шинах»

Комісія у складі: заступника головного конструктора Христинича Б.І., начальника виробництва Дзьоби В.В. та зав. відділом Федака Б.М. склала Акт про те, що результати наукових досліджень Хоми В.В. стосовно підвищення прохідності (у т. ч. максимально можливої швидкості руху) та оптимального розподілу тиску повітря в шинах, були прийняті для практичного використання на підприємстві при проектуванні і дослідно-конструкторських роботах по проекту "Джип-1,5" (договір №117576).

Акт складений для представлення у Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С.З. Гжицького / Північний кампус і не є підставою для одержання премій та інших винагород.

Заступник головного конструктора

Христинич Б.І.

Зав. відділом

Федак Б.М

Нач. виробництва

Дзьоба В.В.

ДОДАТОК Ж

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Грубель М., Крайник Л., Хома В. Імітаційне моделювання руху колісної військової автомобільної техніки бездоріжжям та оцінка його адекватності. *Автошляховик України*. 2020. №2 (2020). С. 21-28 <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2020-2-262-21-28> (Дисертантом розроблено імітаційну модель руху військової автомобільної техніки бездоріжжям)

2. Худавердян Г., Хома В., Крайник Л. Імітаційне моделювання руху полем повноприводної колісної техніки у програмному середовищі MATLAB Simulink. *Вісник ЛНУП. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2023. №26. С. 164–170. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2022.26.164> (Дисертантом розроблено імітаційну модель руху повноприводної колісної техніки полем для транспортного і технологічного режимів)

3. Хома В. Ефективність роздільного регулювання тиску в шинах з умов прохідності та мобільності руху бездоріжжям. *Вісник ЛНУП. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2024. №27. С. 22–26.

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.022> (Дисертантом представлено доопрацьовану імітаційну модель руху повнопривідних колісних транспортних засобів бездоріжжям з врахуванням централізованого та роздільного регулювання тиску в шинах та проведено оцінку його ефективності)

4. Манзяк М., Хома В., Грубель М., Крайник Т. Удосконалення методики оцінки плавності ходу для автомобіля підвищеної прохідності. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2024. №1(22). С. 233-243. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1365> (Дисертантом розроблено двомірну математичну модель двовісного автомобіля підвищеної прохідності з врахуванням характеристик передньої та задньої підвісок і шин, мікропрофілю і фізико-механічних характеристик ґрунту)

5. Hrubel, M., Kraynyk, L., Mikhalieva, M., Zalyпка, V., Manziak, M., Khoma, V., Lanets, O., Ruban, D., Andriienko, A., & Kokhan, V. Improving a methodology for estimating the cross-country ability of all-wheel-drive vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. №2(128). P. 64–72. (SCOPUS) <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.302833> (Дисертантом запропоновано вдосконалену модель *Simulink* для руху повнопривідного транспортного засобу позашляховими дорогами для визначення максимальної швидкості руху та інших параметрів прохідності на основі емпіричних даних)

6. Хома В. Експериментальні дослідження впливу роздільного регулювання тиску в шинах на показники опорної прохідності автомобільної техніки. *Вісник ЛНУП. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2025. №29. С. 64–69. <https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.64-69> (Дисертанту належить розробка методики та експериментального забезпечення дослідження прохідності повнопривідних автомобілів, спрямоване на перевірку результатів теоретичних досліджень, оцінку адекватності імітаційної моделі руху та експериментальне обґрунтування методу роздільного регулювання тиску повітря в шинах)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Хома. В. Мобільність автомобіля в умовах бездоріжжя. *Проблеми з транспортними потоками і напрями їх розв'язання*: матеріали IV Всеукраїнської конференції (Львів, 25-26 березня 2021 р.). Львів: Галицька видавнича спілка, 2021. С. 111-112. (Дисертантом розроблено математичну модель коливань підресореної маси автомобіля при русі бездоріжжям)

8. Хома В., Крайник Л. Підвищення прохідності колісної автотехніки раціональним регулюванням тиску повітря в шинах. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки*. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції (Львів, 14 травня 2021 р.). Львів: НАСВ, 2021. С. 67. (Дисертантом

обґрунтовано раціональні діапазони регулювання тиску повітря у шинах для підвищення прохідності колісних транспортних)

9. Хома В. Роздільне регулювання тиску в шинах повноприводних автомобілів. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту: матеріали X-ї Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції (м. Вінниця 14-15 квітня 2022 р.)* Вінниця: ВНТУ, 2022. С. 304-306. *(Дисертантом за результатами моделювання руху повноприводного автомобіля визначено оптимальний розподіл тиску в шинах по осях та обґрунтовано доцільність роздільного регулювання тиску)*

10. Худавердян Г.А., Хома В.В. Технологічні процеси обробітку ґрунту: комп'ютерне моделювання. *Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем: матеріали III Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції (м. Рівне 19-20 жовтня 2022р.)* Рівне: НУВГП, 2022. 301с. Електронне видання. *(Дисертантом розроблено імітаційну модель руху універсального повнопривідного колісного транспортного засобу в середовищі MATLAB Simulink з урахуванням взаємодії «колесо–ґрунт» та технологічного навантаження)*

11. Манзяк М., Хома В., Грубель М. Оцінка плавності руху колісної військової автомобільної техніки в умовах бездоріжжя. *Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту: матеріали XI-ї Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції (м. Вінниця 13-14 квітня 2023 р.)*. Вінниця: ВНТУ, 2023. С. 221-224. *(Дисертанту належить аналіз конструкцій підвісок колісної військової автомобільної техніки та чинних міжнародних і національних стандартів у сфері оцінки плавності руху)*

12. Хома В., Крайник Л. Вплив регулювання тиску повітря в шинах на взаємодію з опорною поверхнею. *Актуальні проблеми сучасної науки: теоретичні та практичні дослідження молодих учених: матеріали I-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції (м. Полтава 26-27 квітня 2023 р.)* Полтава: ПДАУ, 2023. С. 73-75 *(Дисертантом проаналізовано взаємодію шини з опорною поверхнею та проведено імітаційне моделювання руху шини ИД-370 на сухому піску)*

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

13. Грубель М., Фтемов Ю., Хома В. Експериментальні дослідження параметрів опорної прохідності зразків колісної військової автомобільної техніки. *Системи озброєння та військова техніка*. 2019. № 4(60). С. 7-15. <https://doi.org/10.30748/soivt.2019.60.01> (Дисертантом у межах роботи забезпечено участь у розробленні та застосуванні автоматизованого контрольньо-вимірювального комплексу для реєстрації параметрів руху зразків колісної військової автомобільної техніки)

14. Грубель М., Манзяк М., Хома В., Ланець О., Андрієнко А. Імітаційне моделювання мобільності колісної військової автомобільної техніки за умов руху бездоріжжям. *Військово-технічний збірник НАСВ*. 2023. №28. С. 10–17. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023.10-17> (Дисертантом виконано оцифрування тестового треку Daimler (базового еталонного випробувального покриття) та підготовку вихідних даних для імітаційного моделювання руху колісної військової автомобільної техніки)

Патенти

15. Кохан В.Ф., Крайник Л. В., Грубель М. Г., Манзяк М. О., Хома В. В. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на науково-практичний твір «Спосіб оцінки прохідності колісної військової техніки» № 116929 від 09.03.2023 р.