

Цимбалюк Ю. І.

ORCID: 0000-0003-4839-0944

E-mail: yu.tsymbalyuk@nltu.edu.ua

Цимбалюк І. Ю.

ORCID: 0009-0008-8489-473X

E-mail: ihortsymbaliuk@nltu.edu.ua

Національний лісотехнічний
університет України, м. Львів,
Україна

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ
ПАРАМЕТРІВ ТРЕЛЮВАЛЬНОЇ
СИСТЕМИ ВІД ХАРАКТЕРИСТИКИ
СЕРЕДОВИЩА**

DOI <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.47>

УДК 630*375:[514.85+629.3.012]

Цимбалюк Ю. І., Цимбалюк І. Ю. Дослідження залежності параметрів трелювальної системи від характеристики середовища

Анотація. Дослідження присвячене трелюванню деревини під наметом лісового насадження із застосуванням малогабаритних трелювальних засобів. В якості середовища дослідження роботи трелювальної системи, вибрано штучно створене лісове насадження в рівнинних умовах рельєфу. Мета дослідження полягала у встановленні впливу характеристики лісового насадження на параметри трелювальної системи, які забезпечують її вільне переміщення між деревами на площі, що сприятиме зменшенню кількості дерев з механічними пошкодженнями, внаслідок їх контакту із трелювальною системою. Основні параметри трелювальної системи, які приймаються як основні – це її габаритні розміри, зокрема довжина, яку можна змінювати шляхом зміни довжини лісоматеріалів. Не змінними чинниками приймалися відстані між деревами в ряду та ширина міжряддя лісового насадження, а також таксаційні дані насадження.

Для реалізації мети дослідження було використано комп'ютерну модель, яка дозволяє генерувати середовище роботи трелювальної системи тобто, лісове насадження із прийнятною схемою розміщення дерев та заданим діапазоном відхилення від схеми, а також імітувати і візуалізувати переміщення трелювальної системи у згенерованому лісовому насадженні, враховуючи спосіб трелювання та кут напрямленого зрізання дерев на площі. За основу вибрано поштучне трелювання круглих лісоматеріалів із використанням «повідкового» міні скідера з відповідним обладнанням та враховано напрям зрізання дерев, що слугуватиме для вибору початкового положення трелювальної системи.

В результаті графо-аналітичної обробки результатів дослідження, вдалося отримати основні рівняння регресії та залежності, що встановлюють взаємозв'язок між характеристикою лісового насадження та параметрами трелювальної системи з умови її безперешкодного переміщення в насадженні в плані уникнення контакту із ростучими деревами на площі, що призводить до їх механічних пошкоджень.

Ключові слова: круглий лісоматеріал, кінематика, трелювальна система, штучно створене лісове насадження, моделювання, малогабаритний механізований трелювальний засіб.

Tsymbalyuk Yu. I., Tsymbaliuk I. Yu. Study of the dependence of the parameters of the skidding system on the characteristics of the environment

Abstract. The study is devoted to skidding wood under the canopy of a forest stand using small-sized skidding tools. An artificially created forest stand in flat relief conditions was chosen as the environment for studying the skidding system. The purpose of the study was to

establish the influence of the characteristics of the forest stand on the parameters of the skidding system, which ensure its free movement between trees in the area, which will contribute to reducing the number of trees with mechanical damage due to their contact with the skidding system. The main parameters of the skidding system, which are taken as basic, are its overall dimensions, in particular the length, which can be changed by changing the length of the timber. The distances between trees in a row and the width of the forest stand, as well as the stand assessment data, were taken as fixed factors.

To achieve the research goal, a computer model was used that allows generating the skidding system operating environment, that is, a forest stand with an adopted tree placement scheme and a given deviation range from the scheme, as well as simulating and visualizing the skidding system movement in the generated forest stand, taking into account the skidding method and the angle of directional cutting of trees in the area. The basis was selected as piecemeal skidding of round timber using a "leash" mini skidder with appropriate equipment and the direction of tree cutting was taken into account, which will serve to select the initial position of the skidding system.

As a result of graphical and analytical processing of the research results, it was possible to obtain the main regression and dependence equations that establish the relationship between the characteristics of the forest stand and the parameters of the skidding system from the condition of its unhindered movement in the stand in terms of avoiding contact with growing trees in the area, which leads to their mechanical damage.

Keywords: round timber, kinematics, skidding system, artificial forest stand, modeling, small-sized mechanized skidding device.

Постановка проблеми

Переміщення трелювальної системи під наметом лісового насадження у вибраному напрямку, супроводжується із необхідністю обминання перешкод на смузі трелювання, основними з яких є ростучі на площі дерева. При цьому, очевидним є і те, що розміри трелювальної системи, яка безперешкодно може переміщуватися між деревами, фізично не контактуючи з ними та відповідно не завдаючи їм механічних пошкоджень, головним чином залежать від характеристики насадження, зокрема таких параметрів, як відстань між деревами та середній діаметр стовбура, а також від певних технологічних чинників виконання основних робіт та маневрових властивостей механізованого трелювального засобу. Встановлення взаємозв'язку між характерними показниками середовища роботи трелювальної системи, яким є лісове насадження, його параметрами і таксаційними даними, а також окремими технологічними чинниками, дозволить формувати рекомендації, щодо організації лісосічних робіт, виконувати розрахунки головних параметрів трелювальної системи для конкретного середовища її використання, які забезпечуватимуть безперешкодний, безпечний рух.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Переміщення деревини в процесі виконання основних лісосічних робіт є однією з найбільш важливих і трудомістких операцій. В процесі її виконання завдається найбільше шкоди лісовому середовищу, що виражається руйнуваннями верхнього шару ґрунту, рослинності, а головне пошкодженнями дерев, які залишаються на площі. Саме тому, екологічність є визначальним чинником ефективності процесу трелювання, що можна прослідкувати в більшості наукових публікацій.

Трелювання деревини супроводжується певною кількістю проїздів механізованих трелювальних засобів в одному вибраному напрямку руху. Оцінці негативних наслідків цього, присвячена наукова публікація [1]. Метою дослідження була оцінка змін ущільнення ґрунту, що відбувалися внаслідок руху механізованих засобів під час

виконання лісозаготівельних робіт. Для дослідження використовувалося плантаційне насадження тополі із вирощуванням трави в міжряддях. Досліджувався вплив колісного транспортного засобу з причепом із різними інтенсивностями його руху міжряддями. Встановлено, що найменша інтенсивність руху, яка відповідала одному проїзду, призводила до зниження врожайності трав'яної рослинності на 40,3%. При цьому, впливу на регенерацію дерев не спостерігалось. Рух транспорту вплинув на смертність пагонів дерев, що становила 51,5% при десятиразовому проїзді.

Дослідження [2] стосується також впливу механізованих засобів трелювання деревини на зміну щільності, зокрема, піщаних лісових ґрунтів. Різні рівні ущільнення ґрунту досягалися зміною кількості циклів трелювання деревини в складі різних систем машин. Зокрема виконувався один прохід харвестера, один прохід харвестера і форвардера, кілька проходів обидвох машин. Об'ємну щільність ґрунту та опір проникненню вимірювалися в не порушеній між колійній зоні та безпосередньо на колії. Збільшення кількості проходів техніки призводило до незначного збільшення об'ємної щільності ґрунту, однак, опір проникності зростав більше. Встановлено, що зв'язок між об'ємною щільністю ґрунту та опором проникненню є нелінійним. При цьому, об'ємна щільність стає нечутливою до зміни опору проникненню, при вищому значенні опору проникненню. На піщаних ґрунтах зафіксоване значне збільшення, як об'ємної щільності так і опору проникненню, але рідко це значення перевищувало допустимі межі росту коренів дерев. Авторами рекомендується в таких умовах, виконувати трелювання деревини по підготовлених трелювальних волоках, щоб мінімізувати негативний вплив на екосистему.

Основними цілями дослідження [3] було встановлення продуктивності, енерговитрат та викидів парникових газів під час трелювання деревини за допомогою колісного міні скідера на гумових шинах. Попередні дослідження показали, що такий трелювальний засіб може ефективно замінити спеціалізовані гусеничні трелювальні трактори або звичайні сільськогосподарські в контексті дрібномасштабного лісового господарства. Такі трелювальні засоби виявилися більш екологічними з точки зору витрат енергії та викидів парникових газів. Підтверджені основні параметри, свідчать про доцільність застосування подібної техніки в невеликих лісових господарствах. Встановлена продуктивність трелювання складає $3,2\text{м}^3/\text{год}$, споживання енергії коливається в діапазоні $56,1\dots\dots\dots 113,4\text{МДж}/\text{м}^3$ в залежності від умов. Підтверджене суттєво менше значення шкідливих викидів в атмосфері.

Однією з найбільш актуальних проблем трелювання деревини в насадженні є пошкодження дерев. Ця проблема піднімається в роботі [4]. Авторами публікації виконано дослідження на предмет виявлення залишкових пошкоджень дерев, а також руйнування ґрунту, після проведення рубки і трелювання деревини. Виконані дослідження дозволили встановити, що 12-14% дерев, які залишаються на площі після рубки мають механічні пошкодження при традиційній технології рубки для середньоморських лісів. Якщо застосувати гусеничні трелювальні трактори то частка пошкоджених дерев сягає 20%. Застосування суцільної системи рубки призводить до руйнування 58% грантової поверхні лісосіки. Системи рубок, що базуються на поступовому прорідженні насаджень або вибіркового вирубуванні дерев, призводять до загального руйнування ґрунтової поверхні на 42% площі. Застосування гусеничної трелювальної техніки, завдає більших руйнувань в порівнянні із колісними машинами.

Незважаючи на технічний прогрес, зокрема можливість повної механізації лісосічних робіт, в лісі до цього часу широко використовується тягова сила тварин, навіть при тому, що на заміну їй прийшла мала механізація, яка в загальному має аналогічні екологічні переваги для довкілля. Порівнянню екологічних показників застосування цих двох видів транспорту, присвячується дослідження [5]. Зокрема

дослідження виконувалося для двох сценаріїв застосування тваринної тяги та тяги малих механізованих засобів, а саме на трелюванні деревини в лісі та на польових роботах в сільському господарстві. Підсумкові результати виконаного дослідження показали перевагу застосування тваринної тяги, як в лісі так і для виконання польових робіт в плані екологічних показників. Щоб врахувати вплив на довкілля тварин і механізмів протягом всього життєвого циклу, було використано модульний підхід LCA де механізовані знаряддя та тварини подані, як незалежні модулі. Автори підсумовують, що використання тварин у лісовому та сільському господарствах має оцінюватися враховуючи географічний контекст та з умови досягнення балансу між економічними та екологічними результатами. Особливо в місцях, що піддаються ерозійним процесам внаслідок застосування техніки.

Наукова публікація [6], також стосується порівняння застосування тваринної тяги та механізованих засобів в контексті аналізу надзвичайної ситуації з точки зору їхніх потреб у ресурсах. Для двох систем, які продукують тягову силу, були визначені потоки енергії, матеріалів та інших потреб, які можна отримати з навколишнього середовища та економіки. Діяльність людини та екологічна робота, що приймають участь в процесі створення необхідних ресурсів для роботи систем, оцінювалися з використанням аналізу надзвичайних ситуацій. Встановлено, що основна відмінність між даними системами проявляється у їхній енергетичній сигнатурі. Зокрема, 60% тваринних ресурсів є відновними і лише 9% для механізованих засобів. Із розвитком механізації відбувся перехід від технології, яка забезпечувалася локальними відновлювальними джерелами енергії до технології, яка керувалася не локальними процесами та не відновними джерелами енергії. Автори припускають, що зменшення обсягів корисних копалин, може стати причиною для повернення екологічних технологій з використанням тяги тварин.

У статті [7] пропонується нова парадигма сталого розвитку лісового господарства в умовах зміни кліматичних чинників, праці та довкілля. Метою публікації є зміна парадигми у виконанні основних операцій лісосічних робіт, шляхом переосмислення сталого лісового господарства на основі історичної еволюції даної концепції та зусиль, спрямованих на розв'язання проблем з якими стикаються в лісовому господарстві по всьому світу. Матеріал статті стосується трьох основних напрямків: еволюції концепції сталого розвитку лісового господарства з пропозицією нової концепції; глобальне розуміння сталого лісового господарства із розв'язком поточних проблем сталого розвитку; вдосконалення систем і технологій виконання рубок у фокусі вимог розробленої концепції сталого лісового господарства. Удосконалення системи робіт в лісі з погляду лісової біоекономіки має базуватися на балансі екологічного, економічного і соціального добробуту. Не збалансований акцент, може дати короткостроковий позитивний ефект, але з часом стане причиною руйнування основ сталого розвитку.

Дослідженню життєвого циклу ланцюжка постачання круглої деревини в штаті Теннессі, стосується наукова праця [8], з метою кількісної оцінки впливу на довкілля операцій заготівлі і транспортування деревини. Отримані результати засвідчили про суттєве зменшення утворення парникових газів та використання енергії із викопних природних ресурсів на тону заготовленої деревної сировини у випадку реалізації систем машин на базі бензомоторних пил, в порівнянні із системою машин на базі звальювально-пакетувальних машин. Встановлено, що відносно низька продуктивність системи на базі бензомоторної пили, була з надлишком компенсована низькими витратами паливно-мастильних матеріалів. Також було встановлено, що транспортування деревини мало такий же негативний вплив на довкілля, як і лісозаготівельні роботи.

Наукова праця [9], також присвячена трелюванню деревини за різними технологіями, зокрема розглядається трелювання чокерними трелювальними машинами та з грейферно-чокерним обладнанням. Акцент робиться на розробку моделей

прогнозування часу, а мета дослідження полягала в об'єктивній оцінці часу роботи трелювальних машин із встановленням впливу виробничих чинників на витрати часу, під час виконання окремих операцій процесу трелювання. Дослідження показало, що на загальні витрати часу в процесі трелювання деревини та продуктивність зазначених трелювальних машин, мають вплив такі виробничі показники як відстань трелювання, корисне навантаження та кількість лісоматеріалів, що формують корисне навантаження. Встановлено, що вплив окремих виробничих чинників на загальні витрати часу в процесі робочого циклу є різний для різних типів трелювальних машин. Зальний час простою трелювальної техніки склав 24,6% від загальної тривалості робочої зміни, а середня встановлена продуктивність контрольних машин, становила $6,91 \dots 33,3 \text{ м}^3/\text{зм}$.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження полягає у встановленні залежності основних параметрів малогабаритної трелювальної системи (геометричних розмірів), від схеми розміщення дерев на площі штучного лісового насадження в рівнинних умовах для безперешкодного трелювання круглих лісоматеріалів в напівзавантаженому стані з використанням міні скідера з виносним важелем керування. Умова безперешкодного руху трелювальної системи, полягає в уникненні її фізичного контакту із ростучими деревами та їх механічними пошкодженнями.

Результати дослідження

Для дослідження були використані математичні моделі лісового насадження та кінематики малогабаритної трелювальної системи і розроблена на їх основі комп'ютерна програма, що дозволяє імітувати процес трелювання [11]. При цьому прийнято, що виконується трелювання одиничного круглого лісоматеріалу в напівзавантаженому стані за допомогою гусеничного міні скідера з виносним важелем керування. В якості середовища, прийнято штучне лісове насадження з розміщенням дерев в ньому рядами із відомими відстанями між рядами дерев та в ряду. Також було враховано середній діаметр дерев при основі та радіус зони безпеки навколо стовбура для запобігання його механічним пошкодженням.

Початкове положення трелювальної системи перед початком її руху, визначалося прийнятим кутом напрямленого зрізання дерев на площі лісосіки [11]. Діапазон можливого відхилення розміщення кожного дерева від заданої схеми висадки, становив 0,5м. Також було враховано габаритні розміри міні скідера, які впливатимуть на маневровість трелювальної системи, зокрема, його ширина.

Суть дослідження зводилася до встановлення максимальної загальної довжини малогабаритної трелювальної системи, яка забезпечує її безперешкодний рух в лісовому насадженні без механічних пошкоджень дерев на площі. За основу приймалися рівнинні умови лісоексплуатації, тобто, припускалося, що загальний ухил місцевості не впливає на характер руху трелювальної системи. Крім того, умовами дослідження прийнято, що діаметр круглого лісоматеріалу є таким, який дозволяє його розглядати, як жорсткий нерозтяжний стержень.

Щоб перевірити гіпотезу про нормальний розподіл вихідної величини і розрахувати кількість дубльованих дослідів для кожної серії досліджень, було виконано окрему серію дослідів, величина вибірки якої становила 52 дубльованих дослідів із значеннями основних чинників: відстань між деревами в ряду $a = 3,0 \text{ м}$; ширина міжряддя $b = 2,5 \text{ м}$; кут напрямленого зрізання дерев на площі, що визначає початкове положення трелювальної системи $\beta = 25^0$. Для перевірки гіпотези нормального розподілу вихідної величини, використовувався критерій χ^2 Пірсона.

Для прийнятого плану експериментів, була розроблена методична сітка дослідів, де вказано числові значення рівнів основних чинників, інтервал їх зміни, а також позначення натурального і нормалізованого значень чинників (табл.1).

Таблиця 1

Методична сітка дослідів оцінки довжини трелювальної системи

Найменування чинників	Позначення		Значення (рівні) чинників			Інтервал зміни Δ
	натуральне	нормалізоване	нижній (-1)	основний (0)	верхній (+1)	
Відстань між деревами в ряду, м	a	x_1	2,5	3,0	3,5	0,5
Відстань між рядами дерев, м	b	x_2	2,0	2,5	3,0	0,5
Кут напрямку зрізання дерев, град.	β	x_3	20	25	30	5

Встановлена вибірка дослідів, була розділена на інтервали таким чином, щоб покрити всю вісь в діапазоні від $-\infty$ до $+\infty$, при цьому в кожний інтервал попадало не менше, як п'ять значень вихідної величини. Визначення кількості дубльованих дослідів, що відповідає кожній серії експериментів, виконувалося на основі попередньо проведеної серії дубльованих дослідів. На основі виконаних розрахунків було прийнято загальну кількість дубльованих дослідів.

Таблиця 2

Групування результатів експерименту

№ інтервалу	Межі інтервалу	Середина інтервалу, y_i^*	Число спостережень, m_i	Відносна частота, p_i^*
1	5,8-6,8	6,3	6	0,12
2	6,8-7,7	7,25	11	0,21
3	7,7-8,6	8,15	12	0,23
4	8,6-9,6	9,1	12	0,23
5	9,6-11,2	10,4	11	0,21

Статистична обробка результатів експериментальних досліджень, була виконана з використанням та у відповідності з існуючими сучасними методиками.

Застосований в дослідженні В-план другого порядку, дає можливість описувати залежність вихідної величини від кожного чинника експерименту на основі рівняння параболі. Після розрахунку відповідних коефіцієнтів, отримане рівняння регресії досліджуваного процесу, яке в нормалізованих показниках чинників експерименту, має такий запис:

$$y = 8,19 + 0,697 x_1 + 1,744 x_2 - 0,931 x_3 - 0,153 x_1^2 - 0,048 x_2^2 + 0,647 x_3^2 + 0,165 x_1 x_2 - 0,15 x_1 x_3 - 0,258 x_2 x_3 \quad (1)$$

Статистичний аналіз даного рівняння розпочинався із пошуку дисперсій його коефіцієнтів.

За результатами перевірки значущості коефіцієнтів, що входять в отримане рівняння регресії, встановлено, що деякі з них не є значущими. Це означає, що відповідні члени рівняння із зазначеними коефіцієнтами, доцільно вилучити, а значущі коефіцієнти перерахувати. Уточнення значущих коефіцієнтів рівняння регресії, було виконано із застосуванням методу найменших квадратів для багатofакторних експериментів. З цієї

метою, було створено матрицю базисних функцій, яка слугувала основою для складання системи нормальних рівнянь. Кількість нормальних рівнянь в системі, відповідає кількості коефіцієнтів у рівнянні регресії:

$$\left. \begin{aligned}
 B_0 \sum_1^{14} X_{0j}^2 + B_1 \sum_1^{14} X_{0j}X_{1j} + B_2 \sum_1^{14} X_{0j}X_{2j} + B_3 \sum_1^{14} X_{0j}X_{3j} + B_4 \sum_1^{14} X_{0j}X_{4j} + B_5 \sum_1^{14} X_{0j}X_{5j} &= \sum_1^{14} X_{0j}y_j \\
 B_0 \sum_1^{14} X_{1j}X_{0j} + B_1 \sum_1^{14} X_{1j}^2 + B_2 \sum_1^{14} X_{1j}X_{2j} + B_3 \sum_1^{14} X_{1j}X_{3j} + B_4 \sum_1^{14} X_{1j}X_{4j} + B_5 \sum_1^{14} X_{1j}X_{5j} &= \sum_1^{14} X_{1j}y_j \\
 B_0 \sum_1^{14} X_{2j}X_{0j} + B_1 \sum_1^{14} X_{2j}X_{1j} + B_2 \sum_1^{14} X_{2j}^2 + B_3 \sum_1^{14} X_{2j}X_{3j} + B_4 \sum_1^{14} X_{2j}X_{4j} + B_5 \sum_1^{14} X_{2j}X_{5j} &= \sum_1^{14} X_{2j}y_j \\
 B_0 \sum_1^{14} X_{3j}X_{0j} + B_1 \sum_1^{14} X_{3j}X_{1j} + B_2 \sum_1^{14} X_{3j}X_{2j} + B_3 \sum_1^{14} X_{3j}^2 + B_4 \sum_1^{14} X_{3j}X_{4j} + B_5 \sum_1^{14} X_{3j}X_{5j} &= \sum_1^{14} X_{3j}y_j \\
 B_0 \sum_1^{14} X_{4j}X_{0j} + B_1 \sum_1^{14} X_{4j}X_{1j} + B_2 \sum_1^{14} X_{4j}X_{2j} + B_3 \sum_1^{14} X_{4j}X_{3j} + B_4 \sum_1^{14} X_{4j}^2 + B_5 \sum_1^{14} X_{4j}X_{5j} &= \sum_1^{14} X_{4j}y_j \\
 B_0 \sum_1^{14} X_{5j}X_{0j} + B_1 \sum_1^{14} X_{5j}X_{1j} + B_2 \sum_1^{14} X_{5j}X_{2j} + B_3 \sum_1^{14} X_{5j}X_{3j} + B_4 \sum_1^{14} X_{5j}X_{4j} + B_5 \sum_1^{14} X_{5j}^2 &= \sum_1^{14} X_{5j}y_j
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

На основі розв'язку складеної системи нормальних рівнянь, визначені уточнені значення коефіцієнтів рівняння регресії, що дозволило отримати кінцеве рівняння регресії, яке із нормалізованим позначенням змінних чинників експерименту і уточненими коефіцієнтами, має такий вигляд:

$$y = 8,088 + 0,697 x_1 + 1,744 x_2 - 0,931 x_3 + 0,586x_3^2 - 0,258 x_2 x_3 \quad (3)$$

Інтервали довіри для кожного значимого коефіцієнта рівняння регресії (3), визначалися за допомогою t – критерію Стьюдента.

Адекватність отриманого рівняння регресії (3), перевірялася за критерієм Фішера на основі чого, прийнята гіпотеза про його адекватність для опису досліджуваного процесу. Використовуючи формули, що пов'язують нормалізовані і натуральні значення чинників та виконавши відповідні математичні перетворення, отримано остаточне рівняння регресії з позначенням чинників в натуральному вигляді, яке описує досліджуваний процес:

$$L = 8,0378 + 1,394a + 6,0677b - 63,0266\beta + 76,9427\beta^2 - 5,9127b\beta \quad (4)$$

Дане рівняння регресії (4), пов'язує максимально допустиму довжину трельовальної системи із основними параметрами середовища її застосування.

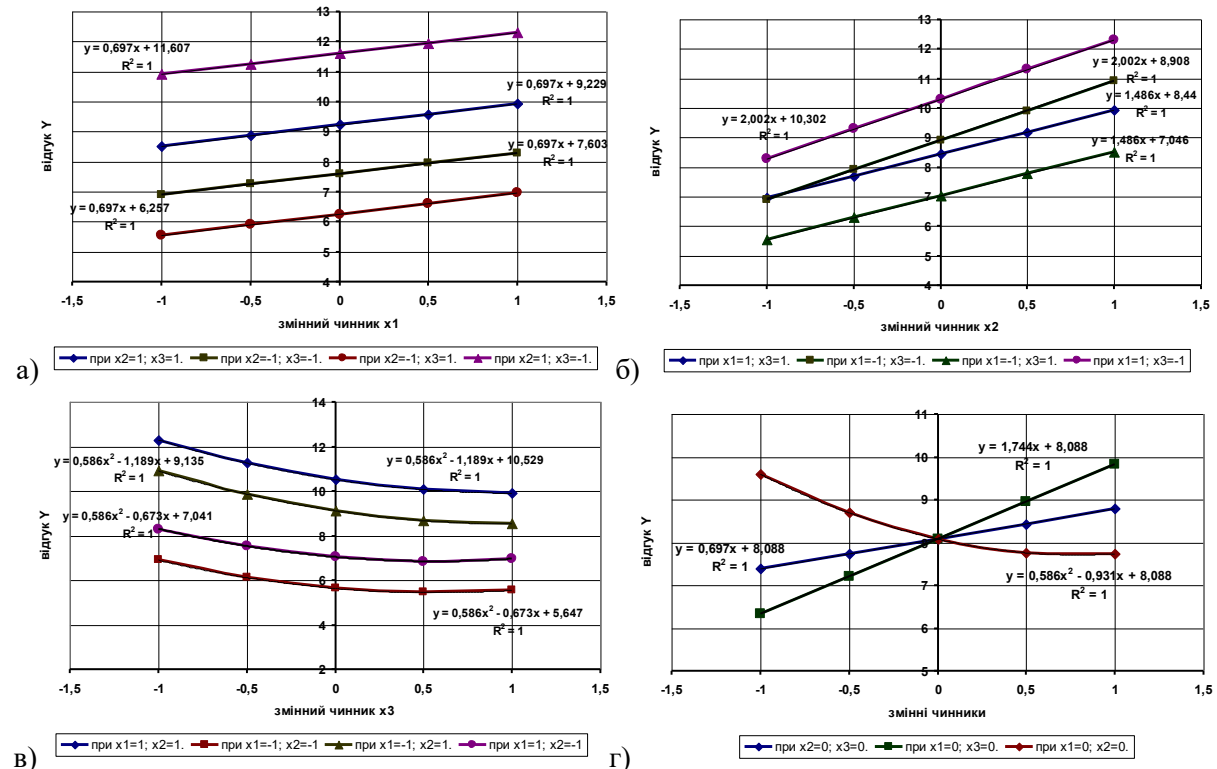
Для аналізу та інтерпретації результатів дослідження, зручніше скористатися рівнянням регресії поданим в нормалізованих показниках (3). Тут слід відмітити, що якщо рівняння є нелінійним, то просте порівняння коефіцієнтів за абсолютною величиною не дозволяє визначати відносний ступінь впливу чинника через присутність квадратичних членів та парної взаємодії.

Відомо, що у квадратичній моделі рівняння, ступінь впливу кожного чинника на відгук є не постійною величиною, а відрізняється в різних точках діапазону варіювання чинника. Якщо присутні парні взаємодії чинників, то і рівнями чинників, що взаємодіють. Встановлений максимальний ступінь впливу кожного із трьох зазначених чинників, буде наступним:

$$x_1: \left| \partial_{x_1 \max} \right| = 0,697; x_2: \left| \partial_{x_2 \max} \right| = 2,002; x_3: \left| \partial_{x_3 \max} \right| = 2,361$$

Для демонстрації та вивчення впливу кожного чинника на відгук, що входить в рівняння регресії, доцільно побудувати графіки залежності $y = f(x_i)$ для кожного змінного чинника, при фіксованих значеннях решти чинників. Для більш повного відображення досліджуваного процесу, змінні чинники досліду доцільно зафіксувати на найбільш характерних рівнях: максимальному +1, мінімальному -1 і основному 0.

Отримані графічні залежності (рис.1) демонструють зміну відгуку під впливом кожного із змінних чинників, при фіксованому значенні на певному рівні двох інших змінних чинників, що входять в рівняння регресії.



а – залежності відгуку від фіксованих значень змінних чинників x_2 ; x_3 ; б – залежності відгуку від фіксованих значень змінних чинників x_1 ; x_3 ; в – залежності відгуку від фіксованих значень змінних чинників x_1 ; x_2 ; г – залежності відгуку від фіксованих значень змінних чинників на нульовому рівні

Рис. 1. Залежності відгуку від значень змінних чинників зафіксованих на найбільш характерних рівнях

Рівняння регресії (4) виражене в натуральних показниках, дозволяє встановлювати залежність максимальної довжини трельовальної системи від конкретної схеми розміщення дерев в лісовому насадженні, їх таксаційних даних та прийнятого кута напрямленого зрізання дерев (рис.2).

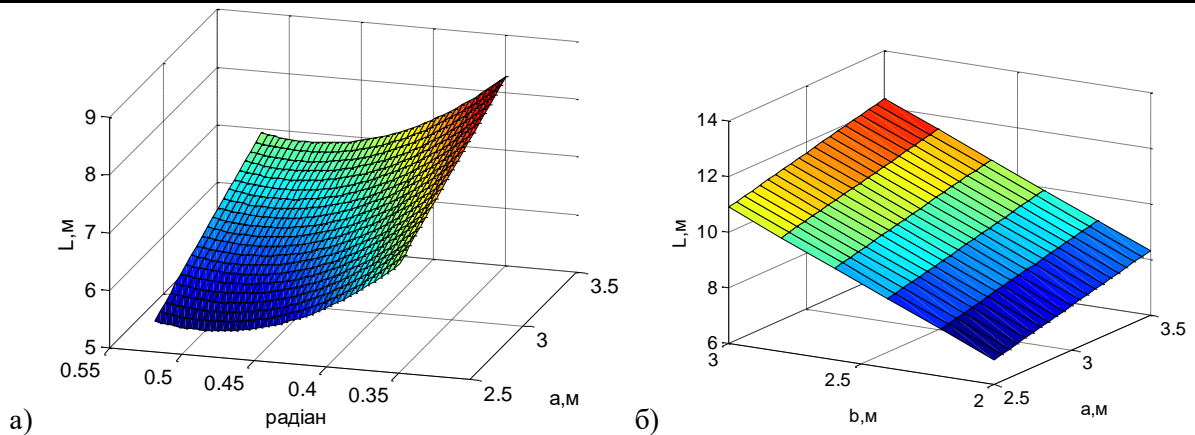


Рис. 2. Залежність довжини трелювальної системи від а) відстані між деревами в ряду та кута напрямленого зрізання дерев при ширині міжряддя 2м та б) від ширини міжряддя та відстані між деревами в ряду, при куті напрямленого зрізання дерев 20°

Під час виконання даних досліджень враховувався середній діаметр дерев при основі стовбура, а радіус зони безпеки навколо стовбура приймався більшим радіуса основи на 20см.

Обговорення

Сучасні цифрові технології впевнено реалізуються в різних галузях народного господарства та науці. Зокрема, комп'ютерне моделювання технологічного процесу під час наукового дослідження, дозволяє реалізовувати поставлені завдання, отримуючи результати достатньо високої якості, які в окремих випадках, навіть краще можуть відображати процес в порівнянні із натурними дослідженнями. Це стало однією із причин, застосування моделювання в лісгосподарському виробництві, особливо для опису виконання окремих операцій господарських рубок. Зазвичай в наукових дослідженнях, найбільше уваги приділяється операції трелювання деревини, як найбільш трудомісткій і важливій операції всього технологічного процесу лісосічних робіт. Виконання зазначеної операції, пов'язане не тільки із переміщенням деревини, але із екологічними наслідками цього процесу тому, в різних лісоексплуатаційних умовах використовуються різні машини і технології, серед яких домінуючим є трелювання з використанням самохідної техніки.

Під час трелювання деревини по трелювальних волоках, велике значення має їх розміщення на місцевості, що значною мірою впливає на вартість трелювальних робіт та їх екологічність [12]. Авторам вдалося розробити модель, яка дозволяє автоматично проектувати мережу трелювальних волоків із врахуванням економічних та екологічних чинників. Серед екологічних чинників, враховується порушення ґрунту. Дана модель враховує розміщення дерев на площі, виконується оцінка вартості трелювання та вартості відновлення його негативних наслідків, зокрема внаслідок руйнування ґрунту, залежно від типу трелювальних засобів та інших технологічних чинників. Запропонована модель може реалізовувати різні виробничі сценарії, що підтверджує її практичну цінність під час проектування лісосічних робіт.

Запропонована модель стосується класичної технології виконання лісосічних робіт з прокладанням мережі трелювальних шляхів, яка не завжди є доцільною під час поступових чи вибіркового рубок або рубок догляду за лісовими насадженнями. При цьому, автори акцентують увагу головним чином на руйнуванні ґрунту під час трелювання, що є оправдано на промислових рубках головного користування. Під час

виконання рубок догляду, не менш важливим чинником є пошкодження дерев на площі, що неминуче відбувається під час трелювання в насадженні.

Для моделювання процесу трелювання деревини, широко використовується об'єктно-орієнтоване моделювання [13]. Авторами даної наукової публікації, розроблено модель, яка дозволяє генерувати лісове насадження на площі, імітує зрізання дерев бензомоторною пилою чи багатоопераційною машиною з під'їздом наприклад, харвестера до дерева, а також роботу форвардера. В підсумку, можна отримати вартість лісосічних робіт в залежності від їх структури та продуктивність вибраної системи машин. Також модель передбачає можливість відображення інтенсивності переміщення техніки задіяної в процесі, що очевидно буде корисним під час екологічної оцінки.

Зазначена система машин, що розглядається в публікації є типовою в першу чергу для виконання рубок головного користування. Під час виконання рубок догляду або реалізації системи поступових рубок, доцільно застосовувати менш габаритну техніку та освоєння площі широкими пасіками.

Загальна суть лісогосподарських рубок, зводиться до поступового прорідження лісового насадження, яке завершується незадовго до повного вирубування дерев на площі. При цьому вибрані та зрізані і попередньо оброблені дерева, слід трелювати до місця концентрації деревини на площі. Вартість трелювання окремого зрізаного дерева, залежить від його місця розташування на площі, розмірних характеристик [14] та інших чинників, а тому буде різною для кожного окремо вибраного дерева. В зазначеній науковій статті, запропонована модель, яка виконує оцінку вартості трелювання, кожного вибраного в насадженні дерева під час рубки прорідження. Модель дозволяє вибирати оптимальне місце для концентрації деревини, щоб зменшити вартість трелювання вибраних в рубку дерев, а також враховує рельєф місцевості, зокрема середній ухил.

Однак, в зазначеній науковій публікації не фігурує показник пошкодження дерев в насадженні під час трелювання деревини та не має рекомендацій стосовно параметрів трелювальної системи.

Під час трелювання деревини по трелювальних шляхах, загальна площа останніх досягає 10% площі відведеної в рубку [15] і саме трелювальні шляхи в певних умовах, зокрема складного рельєфу є потенційними ділянками розвитку ерозійних процесів. По цій причині, авторами зазначеної наукової публікації, пропонується в умовах із крутими схилами замінювати наземне трелювання деревини на трелювання з використанням канатних систем, які дозволяють уникати руйнування чи порушення ґрунту. Мета дослідження зводилося до порівняння економічних втрат внаслідок руйнування ґрунту під час трелювання деревини різними способами. Підтверджено менші втрати ґрунту під час використання канатних систем і при цьому звертається увага на важливість вибору місць розгалужень трелювальних шляхів.

Наукова робота демонструє порівняльне дослідження трелювання деревини в конкретних лісоексплуатаційних умовах і стосується головним чином промислової рубки. За головний критерій екологічності, вибрано руйнування ґрунту, як потенційний чинник виникнення ерозії.

Висновки

1. Отримано рівняння регресії, яке з достатньою точністю відображає взаємозв'язок між геометричними розмірами трелювальної системи, способом трелювання та характеристикою середовища.

2. Встановлено, що найбільший вплив на максимально допустиму довжину трелювальної системи, серед чинників, які враховувалися, має кут напрямленого зрізання дерев.

3. Встановлено, що ступінь впливу чинника, що враховує кут напрямленого зрізання дерев на відгук складає 2,361, а ступені впливу чинників, які враховують відстань між рядами дерев та відстань між деревами в ряду складають 2,002 і 0,697 відповідно.

4. Показано, що відгук зростатиме за умови збільшення ширини міжряддя та відстані між деревами в ряду, а кут напрямленого зрізання дерев прямуватиме до мінімального. Зокрема, довжина трелювальної системи становитиме 12,304м при ширині міжряддя 3,0м, відстані між деревами в ряду 3,5м і куті напрямленого зрізання дерев 20° . Відповідно, якщо ширина міжряддя зменшується до 2,0м, а відстань між деревами в ряду до 2,5м, при куті напрямленого зрізання дерев 30° , максимально допустима довжина трелювальної системи становитиме 5,56м.

5. На основі виконаного дослідження, рекомендується напрямлене зрізання дерев в насадженні виконувати під кутом 20° , що забезпечить можливість трелювання лісоматеріалів в напівзавантаженому стані максимальної довжини, якщо зазначений кут визначає початкове положення трелювальної системи.

Список використаних джерел

1. R. Balbuena, P. Mac Donagh, J. Marquina, D. Jorajuria, A. Terminiello, J. Claverie. PA-Precision Agriculture: Wheel Traffic Influence on Poplar Regeneration and Grass Yield. *Biosystems Engineering*. Volume 81, Issue 4, April 2002, Pages 379-384. <https://doi.org/10.1006/bioe.2001.0028>

2. E. Ampoorter, R. Goris, W.M. Cornelis, K. Verheyen. Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils. *Forest Ecology and Management*. Volume 241, Issues 1–3, 30 March 2007, Pages 162-174. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.019>

3. Dinko Vusić, Marijan Šušnjar, Enrico Marchi, Raffaello Spina, Željko Zečić, Rodolfo Picchio. Skidding operations in thinning and shelterwood cut of mixed stands – Work productivity, energy inputs and emissions. *Ecological Engineering*. Volume 61, Part A, December 2013, Pages 216-223. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.09.052>

4. Spinelli, R., Magagnotti, N., & Nati, C. (2010). Benchmarking the impact of traditional small-scale logging systems used in Mediterranean forestry. *Forest Ecology and Management*. Volume 260, Issues 11, 15 November 2010, Pages 1997-2001. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.048>

5. Alessandro K. Cerutti, Angela Calvo, Sander Bruun. Comparison of the environmental performance of light mechanization and animal traction using a modular LCA approach. *Journal of Cleaner Production*. Volume 64, 1 February 2014, Pages 396-403. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.027>

6. Torbjörn Rydberg, Jan Jansén. Comparison of horse and tractor traction using energy analysis. *Ecological Engineering*. Volume 19, Issue 1, July 2002, Pages 13-28. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(02\)00015-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(02)00015-0)

7. Enrico Marchi, Woodam Chung, Rien Visser, Dalia Abbas, Tomas Nordfjell, Piotr S. Mederski, Andrew McEwan, Michal Brink, Andrea Laschi. Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate. *Science of The Total Environment*. Volume 634, 1 September 2018, Pages 1385-1397. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.084>

8. Dalia Abbas, Robert M. Handler. Life-cycle assessment of forest harvesting and transportation operations in Tennessee. *Journal of Cleaner Production*. Volume 176, 1 March 2018, Pages 512-520. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.238>

9. Orlovský, L., Messingerová, V., & Danihelová, Z. (2020). Analysis of time efficiency of skidding technology based on the skidders. *Cent. Eur. For. J. (Central European Forestry Journal)* 66(2020) 177-187. <https://doi.org/10.2478/forj-2020-0016>

10. Цимбалюк Ю. І. Технологічні особливості освоєння лісосік із застосуванням малогабаритної трелювальної техніки / Ю. І. Цимбалюк// Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук.-техн. праць. – Львів: РВВ НЛТУ України, 2025. – т.35, №4 – С. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.36930/40350404>

11. Цимбалюк Ю.І., Цимбалюк І.Ю. Моделювання процесу трелювання деревини під наметом лісового насадження. Науковий журнал "Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів", №27 - Харків: ДБТУ, 2025 – С.80-92. DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-80>

12. Marco A. Contreras, David L. Parrott, Woodam Chung. Designing Skid-Trail Networks to Reduce Skidding Cost and Soil Disturbance for Ground-Based Timber Harvesting Operations. *Forest Science*, Volume 62, Issue 1, 1 February 2016, Pages 48–58. <https://doi.org/10.5849/forsci.14-146>

13. Jingxin Wang, Chris B. LeDoux. Estimating and Validating Ground-Based Timber Harvesting Production Through Computer Simulation. *Forest Science*, Volume 49, Issue 1, February 2003, Pages 64–76. <https://doi.org/10.1093/forestscience/49.1.64>

14. Marco A. Contreras, Woodam Chung, A Modeling Approach to Estimating Skidding Costs of Individual Trees for Thinning Operations. *Western Journal of Applied Forestry*, Volume 26, Issue 3, July 2011, Pages 133–146. <https://doi.org/10.1093/wjaf/26.3.133>

15. William C. Worrell, M. Chad Bolding, Wallace M. Aust. Potential Soil Erosion following Skyline Yarding versus Tracked Skidding on Bladed Skid Trails in the Appalachian Region of Virginia. *Southern Journal of Applied Forestry*, Volume 35, Issue 3, August 2011, Pages 131–135. <https://doi.org/10.1093/sjaf/35.3.131>

References

1. R. Balbuena, P. Mac Donagh, J. Marquina, D. Jorajuria, A. Terminiello, J. Claverie. PA—Precision Agriculture: Wheel Traffic Influence on Poplar Regeneration and Grass Yield. *Biosystems Engineering*. Volume 81, Issue 4, April 2002, Pages 379-384. <https://doi.org/10.1006/bioe.2001.0028>

2. E. Ampoorter, R. Goris, W.M. Cornelis, K. Verheyen. Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils. *Forest Ecology and Management*. Volume 241, Issues 1–3, 30 March 2007, Pages 162-174. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.019>

3. Dinko Vusić, Marijan Šušnjar, Enrico Marchi, Raffaello Spina, Željko Zečić, Rodolfo Picchio. Skidding operations in thinning and shelterwood cut of mixed stands – Work productivity, energy inputs and emissions. *Ecological Engineering*. Volume 61, Part A, December 2013, Pages 216-223. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.09.052>

4. Spinelli, R., Magagnotti, N., & Nati, C. (2010). Benchmarking the impact of traditional small-scale logging systems used in Mediterranean forestry. *Forest Ecology and Management*. Volume 260, Issues 11, 15 November 2010, Pages 1997-2001. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.048>

5. Alessandro K. Cerutti, Angela Calvo, Sander Bruun. Comparison of the environmental performance of light mechanization and animal traction using a modular LCA approach. *Journal of Cleaner Production*. Volume 64, 1 February 2014, Pages 396-403. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.027>

6. Torbjörn Rydberg, Jan Jansén. Comparison of horse and tractor traction using energy analysis. *Ecological Engineering*. Volume 19, Issue 1, July 2002, Pages 13-28. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(02\)00015-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(02)00015-0)

7. Enrico Marchi, Woodam Chung, Rien Visser, Dalia Abbas, Tomas Nordfjell, Piotr S. Mederski, Andrew McEwan, Michal Brink, Andrea Laschi. Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate. *Science of The Total Environment*.

Volume 634, 1 September 2018, Pages 1385-1397.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.084>

8. Dalia Abbas, Robert M. Handler. Life-cycle assessment of forest harvesting and transportation operations in Tennessee. *Journal of Cleaner Production*. Volume 176, 1 March 2018, Pages 512-520. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.238>

9. Orlovský, L., Messingerová, V., & Danihelová, Z. (2020). Analysis of time efficiency of skidding technology based on the skidders. *Cent. Eur. For. J. (Central European Forestry Journal)* 66(2020) 177-187. <https://doi.org/10.2478/forj-2020-0016>

10. Tsymbalyuk, Yu.I. (2025). Technological aspects of the development of felling areas using small-sized skidding equipment. *Scientific Bulletin of UNFU*, 35(4), 36-42. <https://doi.org/10.36930/40350404>

11. Tsymbalyuk Yu.I., Tsymbaliuk I.Yu. Modeling the process of skidding wood under the canopy of a forest plantation. [Text] /Yu. I. Tsymbalyuk// Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes: scientific journal. – Kharkiv, 2025, No. 27 – P. 80-92. DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-80>

12. Marco A. Contreras, David L. Parrott, Woodam Chung. Designing Skid-Trail Networks to Reduce Skidding Cost and Soil Disturbance for Ground-Based Timber Harvesting Operations. *Forest Science*, Volume 62, Issue 1, 1 February 2016, Pages 48–58. <https://doi.org/10.5849/forsci.14-146>

13. Jingxin Wang, Chris B. LeDoux. Estimating and Validating Ground-Based Timber Harvesting Production Through Computer Simulation. *Forest Science*, Volume 49, Issue 1, February 2003, Pages 64–76. <https://doi.org/10.1093/forestscience/49.1.64>

14. Marco A. Contreras, Woodam Chung, A Modeling Approach to Estimating Skidding Costs of Individual Trees for Thinning Operations. *Western Journal of Applied Forestry*, Volume 26, Issue 3, July 2011, Pages 133–146. <https://doi.org/10.1093/wjaf/26.3.133>

15. William C. Worrell, M. Chad Bolding, Wallace M. Aust. Potential Soil Erosion following Skyline Yarding versus Tracked Skidding on Bladed Skid Trails in the Appalachian Region of Virginia. *Southern Journal of Applied Forestry*, Volume 35, Issue 3, August 2011, Pages 131–135. <https://doi.org/10.1093/sjaf/35.3.131>

Отримано: 06.04.2026. Прийнято: 16.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.