

Цимбалюк Ю.І.,
Цимбалюк І.Ю.,
Національний
лісотехнічний університет
України,
м. Львів, Україна
E-mail:
yu.tsymbalyuk@nltu.edu.ua
ihortsymbaliuk@nltu.edu.ua

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ
ТРЕЛЮВАННЯ ДЕРЕВИНИ ПІД
НАМЕТОМ ЛІСОВОГО НАСАДЖЕННЯ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-80>

УДК 630*375:[514.85+629.3.012]

Цимбалюк Ю.І., Цимбалюк І.Ю. Моделювання процесу трелювання деревини під наметом лісового насадження

Анотація. У дослідженні розглядається питання трелювання деревини із застосуванням малогабаритних механізованих трелювальних засобів на ділянках лісового насадження, створеного штучним шляхом за відомою схемою розміщення дерев в ньому. За основу взято умови рівномірно поступових рубок або аналогічних до них, коли трелювання деревини необхідно виконувати між деревами, які залишаються на площі. Метою дослідження є створення моделі штучного лісового насадження та математичної моделі кінематики трелювальної системи в ньому і розроблення на їх основі симуляційної комп'ютерної моделі переміщення трелювальної системи в насадженні.

Основою реалізації мети дослідження є математичне моделювання, що ґрунтується на основних законах теоретичної механіки та фізики. При цьому враховано та відображено технічні можливості малогабаритного трелювального засобу, фізичні властивості предмету праці та спосіб його закріплення на трелювальному засобі. Враховано основні ознаки середовища роботи трелювальної системи, що впливатимуть на її кінематику та габаритні розміри.

Результатом виконаного дослідження є модель штучного лісового насадження, математична модель кінематики малогабаритної трелювальної системи з описом часткових випадків її чисельна реалізація та комп'ютерна модель симуляції переміщення трелювальної системи в насадженні.

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

Tsymbalyuk Yu.I., Tsymbalyuk I.Yu. Modeling the process of skidding wood under the canopy of a forest plantation

Abstract. The study examines the issue of skidding wood using small-sized mechanized skidding tools in areas of a forest plantation created artificially according to a known scheme for placing trees in it. The basis is the conditions of evenly gradual felling or similar to them, when skidding wood must be performed between the trees that remain on the area. The purpose of the study is to create a model of an artificial forest plantation and a mathematical model of the kinematics of the skidding system in it and to develop a simulation computer model of the skidding system movement in the plantation on their basis.

The basis for implementing the study goal is mathematical modeling, which is based on the basic laws of theoretical mechanics and physics. At the same time, the technical capabilities

of a small-sized skidding tool, the physical properties of the object of work and the method of its fixation on the skidding tool are taken into account and reflected. The main features of the skidding system's operating environment that will affect its kinematics and overall dimensions are taken into account.

The result of the research is a model of an artificial forest stand, a mathematical model of the kinematics of a small-sized skidding system with a description of partial cases, its numerical implementation, and a computer model for simulating the movement of the skidding system in the stand.

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

Постановка проблеми

Під час трелювання деревини на площі із залишеними на ній деревами, кінематика трелювальної системи зводиться до об'їзду перешкод на шляху вибраного напрямку руху. При цьому слід уникати будь-якого контакту трелювальної системи із деревом для уникнення його механічного пошкодження. Встановлення взаємозв'язку між властивостями середовища та габаритними розмірами трелювальної системи є одним із шляхів зменшення кількості пошкоджених дерев.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В структурі основних лісосічних робіт, операція трелювання вважається найбільш складною і ресурсовитратною. Одночасно і екологічність виконання лісгосподарських заходів у вигляді рубок, також в основному залежить від наслідків трелювання деревини, а вони є різносторонніми і мають зазвичай довготривалий негативний ефект.

Зокрема, застосування важкої техніки, проявляється суттєвим ущільненням ґрунту [1]. Авторами статті був виконаний матаналіз з метою кількісної оцінки впливу ущільнення ґрунту на ріст, приріст по діаметру та виживання саджанців. Встановлено, що негативні наслідки проявляються більше на важких ґрунтах в порівнянні із піщаними.

Одним із напрямків зменшення ущільнення ґрунту під час трелювання деревини є використання легкої техніки [2]. В своїй роботі, автори статті виконували дослідження роботи міні трелювальника на гумових шинах з метою оцінки його робочого часу, енерговитрат, продуктивності та продукування парникових газів. Авторами зазначається, що в контексті дрібномасштабного лісового господарства, така техніка є більш екологічною в плані витрат енергії та продукування парникових газів в порівнянні із сільськогосподарськими тракторами чи спеціалізованими трелювальними машинами і може успішно з ними конкурувати.

У науковій публікації [3], виконано порівняльне дослідження впливу двох типів рушіїв трелювальних машин на пористість ґрунту. В підсумку, авторами публікації підтверджується вища екологічність колісних рушіїв в порівнянні із гусеничними в плані ущільнення та зменшення пористості ґрунту, хоча наслідки, загалом, дуже подібні. При цьому звертається увага на те, що при цьому велике значення має вологість ґрунту, тому під час трелювання деревини, слід вибирати періоди коли вологість ґрунту буде мінімальною, щоб зменшити негативні наслідки.

Під час трелювання деревини на площі де є насадження певної повноти, завжди відбуваються механічні пошкодження дерев. У роботі [4] опубліковано результати дослідження залишкових пошкоджень дерев в насадженні після виконання рубки, а також степінь порушення ґрунтової поверхні після трелювання деревини. Встановлено, що у випадку застосування гусеничної трелювальної техніки, пошкодження дерев на площі перевищує 20%, а порушення ґрунту становило 58+% при суцільній системі рубки і 42% під час прорідження насадження чи вибіркової рубки. При цьому, під час суцільної

системи рубки встановлено у п'ять разів більше пошкоджень ґрунту на глибину 5см і більше в порівнянні із рубками прорідження чи вибірковими. У підсумку встановлено, що під час проріджувальних чи вибіркових рубок, відбувається більше пошкоджень дерев, але менше руйнується ґрунт. Гусенична техніка, що працює в лісі, завдає більше руйнувань в порівнянні із колісною.

Наукове дослідження [5] присвячене рубкам прорідження в лісових насадженнях з метою оцінки впливу напівмеханізованих систем лісозаготівлі на дерева, фізичні характеристики ґрунту та природне відновлення лісу. Встановлено, що трелювальна техніка із лебідкою та канатно-блочним оснащенням дозволяє досягнути суттєвого зменшення пошкодження дерев та руйнування ґрунту, особливо якщо використовувати для трелювання вантажну каретку, що переміщується по натягнутому канату.

Сучасні цифрові технології дозволяють значно розширити дослідницькі можливості, зокрема шляхом створення та використання імітаційного моделювання. У науковій роботі [6], авторами використано імітаційне моделювання для дослідження взаємозв'язку між інтенсивністю рубки та пошкодженням дерев в процесі цього. Встановлено, що за низької інтенсивності, пошкодження дерев відбувається в основному, внаслідок будівництва трелювальних шляхів. Збільшення інтенсивності рубки призводить до збільшення відсотка вторинних пошкоджень дерев вздовж трелювальних шляхів. Автори стверджують, що зменшення площі вирубки і збільшення інтенсивності рубки призводить до зменшення негативних наслідків для лісу. Крім того, більша інтенсивність рубки дозволяє збільшити термін між прийомами рубки, що сприяє кращому відновленню лісу.

Все більше науковців схиляються до необхідності обмеження використання потужної, особливо гусеничної техніки в лісах. Цій тематиці присвячене дослідження [7], що стосується використання гусеничної техніки в гірських умовах. Автори пропонують замінювати гусеничні трелювальні машини на міні трелювальну техніку на колісному ході. Під час дослідження встановлено, що така заміна дала бажаний екологічний ефект, економічну перевагу та призвело до зростання безпеки праці. Вартість заготівлі 1м³ деревини вдалося знизити на 30...50%, а продуктивність трелювання при середній відстані 130м, зросла на 1,2м³.

Дослідження [9] стосується дрібномасштабного лісівництва, а його метою була оцінка впливу різних лісівничих методів на продуктивність та витрати під час виконання лісогосподарських рубок, а також створення моделі продуктивності типової системи машин на рубках прорідження. Для дослідження були використані три ділянки лісового насадження на яких виконувалися рубки впродовж тридцяти років з різною інтенсивністю прорідження. Розроблена модель визначення продуктивності системи машин, яка включає ручний механізований інструмент і колісний сільськогосподарський трактор, обладнаний лебідкою. Дослідження підтвердили економічну доцільність заготівлі деревної маси із дерев відносно невеликого діаметру, які забираються із насадження.

До теперішнього часу під час виконання рубок в лісових насадженнях, використовуються як механізовані трелювальні засоби, так і трелювання з використанням тварин, зокрема коней. В дослідженні [10], виконувалося порівняння екологічних показників внаслідок використання на трелюванні коней та колісних тракторів. Отримані результати свідчать про вищу екологічність процесу із застосуванням на трелюванні, особливо в плані сприяння природного відновлення лісу.

Огляд тематичних наукових публікацій, свідчить про не достатньо висвітлену проблему механічних пошкоджень дерев в насадженні під час роботи трелювальної системи. Зокрема, мало приділяється уваги кінематиці та взаємозв'язку габаритних

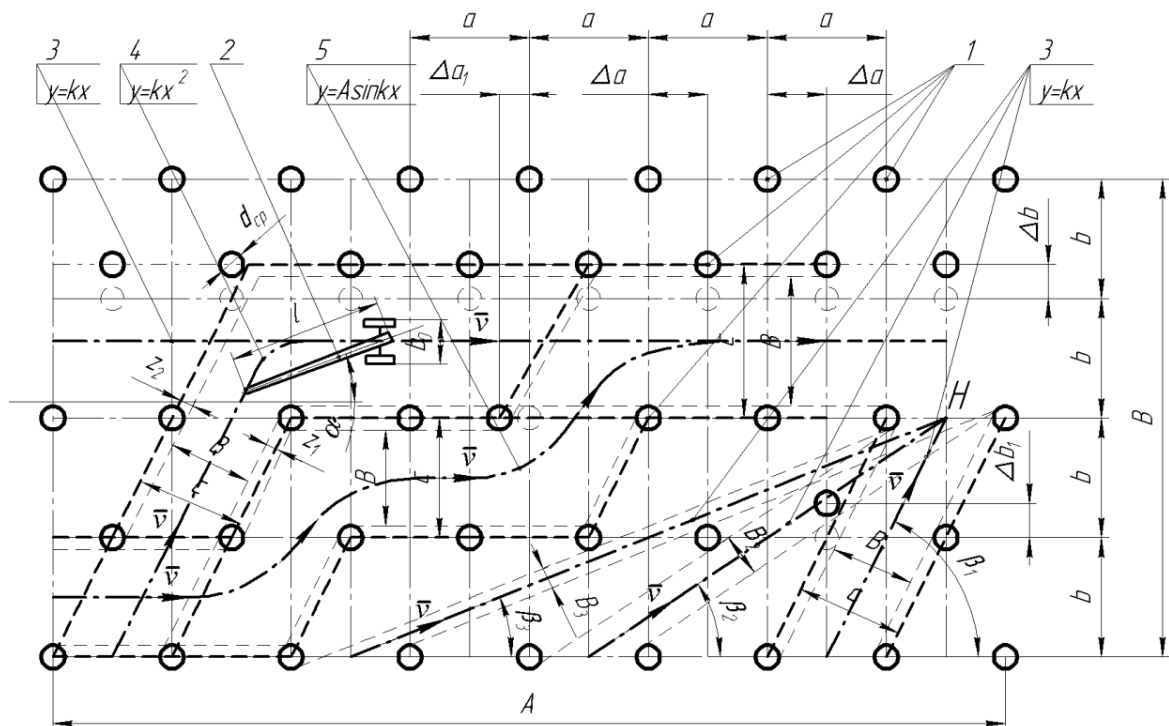
розмірів трелювальної системи із характерними параметрами лісового насадження, від яких значною мірою залежить частота контактів із деревами на смузі трелювання.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є обґрунтування умов безперешкодного переміщення малогабаритної трелювальної системи, що використовується в лісовому насадженні, яке характеризується відомою схемою розміщення дерев та розроблення комп'ютерної моделі симуляції процесу трелювання, що дозволить аналізувати та підбирати параметри трелювальної системи для конкретних лісоексплуатаційних умов.

Результати дослідження

Основою моделювання процесу трелювання деревини малогабаритними механізованими засобами є створення моделі середовища та узагальнений математичний опис кінематики трелювальної системи в ньому із врахуванням особливостей трелювального засобу, фізичних властивостей предмету праці та способу трелювання. Очевидно, що середовищем застосування трелювальних засобів є лісове насадження в якому реалізується певний вид лісогосподарської рубки згідно прийнятої технології. Лісові насадження при цьому можуть бути як штучного так і природного походження, що мають суттєві відмінності, які важко відобразити в одній узагальненій моделі. Виходячи з цього та враховуючи тенденцію відтворення та формування лісів, яка ґрунтується на створенні лісових культур шляхом висаджування саджанців, за основу приймемо штучно створене лісове насадження (рис. 1).



1 – дерева в перерізі стовбура при основі; 2 – малогабаритна трелювальна система;
 3, 4, 5 – ймовірні траєкторії руху трелювальної системи

Рис. 1. Розрахункова модель ділянки штучно створеного лісового насадження

Найбільш важливою характеристикою насадження, є схема розподілу дерев по площі, яка під час штучного створення насадження є відомою і зберігається навіть після виконання вікових доглядових рубок. В рівних умовах, лісові насадження створюють в

основному шляхом висаджування саджанців головної породи рядами з певною віддалю між ними та встановленою відстанню в ряду. Створене таким способом насадження приймемо за базове для розроблення його моделі.

Таким чином, відстань між рядами дерев або ширину міжряддя, позначимо b (рис.1), а відстань між деревами в ряду – a . В силу різних чинників, зазвичай відстань між деревами в ряду відхиляються в ту чи іншу сторону від прийнятої в певному діапазоні. Це відхилення врахуємо в моделі насадження, позначивши як Δa_1 , а величину зміщення дерев у двох сусідніх рядах позначимо Δa . Аналогічним чином, окремі дерева можуть «випадати» з ряду, зміщуючись в сторону міжряддя на певну величину Δb_1 або може бути зміщення всього ряду, змінюючи ширину міжряддя на Δb . Вважатимемо, що на площі зростає чисте одновікове насадження, дерева якого при основі мають певний середній діаметр d_{cp} .

Ширину площі з якої виконується трелювання деревини, позначимо як B , а її довжину буквою A . З прив'язкою до прямокутної системи координат, координати розміщення будь-якого дерева можна виразити як:

$$\begin{cases} x_n = (n - 1) \cdot a \pm \Delta a \pm \Delta a_1; \\ y_n = (m - 1) \cdot b \pm \Delta b \pm \Delta b_1. \end{cases} \quad (1)$$

де n – загальна кількість дерев в ряду;
 m – загальна кількість рядів на площі.

Максимальну ширину смуги трелювання на якій може виконуватися маневрування трелювальної системи, позначимо B_1 , а ширину трелювальної системи b_0 . З врахуванням схеми розміщення дерев на площі, можна визначити максимально допустиму ширину трелювальної системи, що переміщується по прямій до вибраної точки не маневруючи між деревами:

$$b_0 \leq \frac{(a - \Delta a) \cdot b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (2)$$

Даний вираз має зміст за умови: $0 \leq \Delta a \leq \frac{a}{2}$. У випадку маневрування, цей параметр виражатиметься залежністю: $b_0 = \frac{b \cdot (a + \Delta a) - \Delta a \cdot b}{\sqrt{b^2 + (a + \Delta a)^2}} = \frac{b \cdot a}{\sqrt{b^2 + (a + \Delta a)^2}}$ (2').

Очевидно, що під час трелювання деревини, трелювальна система переміщуватиметься зручними для руху траєкторіями, що складатимуться з прямолінійних та криволінійних ділянок, які можна описати відомими рівняннями прямої $y = kx$, параболи $y = kx^2$ чи синусоїди $y = A \sin kx$ (рис.1).

Для виведення основного рівняння кінематики трелювальної системи, введемо ряд припущень та уточнень. Вважатимемо, що трелювання деревини у вигляді одного сортименту, в напів завантаженому стані, виконується із застосуванням міні скідера «повідкового» типу. З цього можна припустити, що загальна довжина трелювальної системи визначатиметься довжиною сортименту через те, що тягова одиниця майже повністю знаходиться під ним. Спосіб закріплення сортименту дозволяє міні скідеру вільно маневрувати, змінюючи кут між його поздовжньою віссю в плані та поздовжньою віссю сортименту (рисунок 2).

Вважатимемо, що довжина трелювальної системи l , визначається точками M_1M_2 , які є її початком і кінцем відповідно і рух її початкової точки M_1 , що знаходиться на трелювальному засобі, відбувається в площині XOY , певною криволінійною траєкторією, яку можна виразити рівнянням:

$$y = f(x) \quad (3)$$

Подібну криволінійну траєкторію описуватиме під час руху і кінцева т. M_2 трелювальної системи, яка знаходиться на частині сортименту, що ковзає по опорній поверхні. Її рівняння відносно системи координат XOY , можна записати у вигляді:

$$\eta = \varphi(\xi) \quad (4)$$

В довільний момент часу, трелювальна система займатиме певне положення в системі координат XOY , яке можна виразити залежностями між координатами x, y її початкової точки M_1 та координатами ξ, η її кінцевої точки M_2 .

$$x = \xi + l \cdot \cos \alpha, \quad (5)$$

$$y = \eta + l \cdot \sin \alpha. \quad (6)$$

де α – кут між віссю OX та трелювальною системою в певний момент часу.

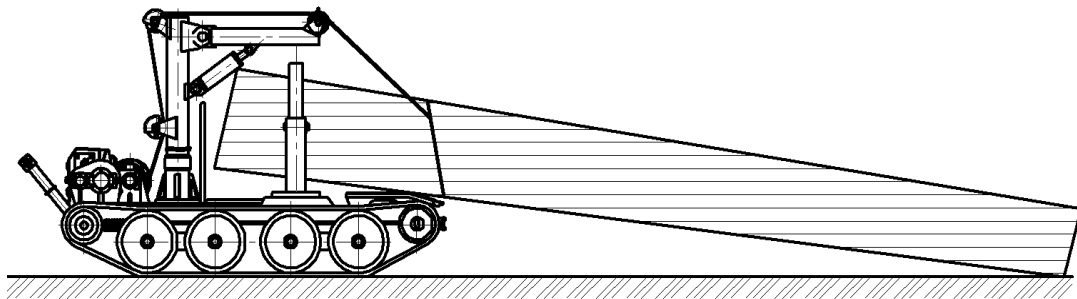
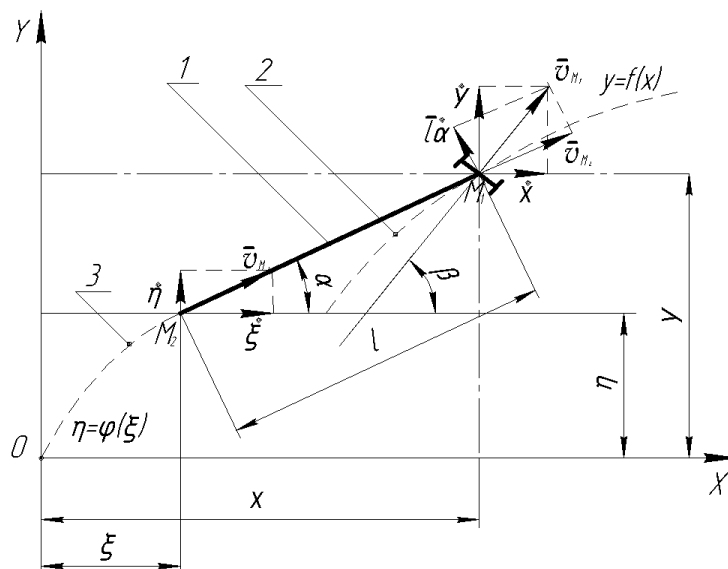


Рис.2. Компонувальна схема малогабаритної трелювальної системи

Використовуючи рівняння (5) і (6), можна записати таку залежність:

$$(y - \eta)^2 + (x - \xi)^2 = l^2. \quad (7)$$



1 – малогабаритна трелювальна система; 2 – траєкторія руху трелювального засобу; 3 – траєкторія, що описує частина сортименту, яка ковзає по опорній поверхні

Рис. 3. Узагальнена розрахункова схема кінематики малогабаритної трелювальної системи

На основі отриманої залежності (7) можна стверджувати, що кінцева точка M_2 трелювальної системи, рухатиметься дугою кола радіусом l , а центр цього кола переміщуватиметься криволінійною траєкторією, відповідно з рівнянням (3).

Очевидно, що рух кінцевої точки M_2 співпадатиме з напрямом M_2M_1 , а це означає, що трелювальна система в кожний момент часу знаходитиметься на дотичній до кривої $\eta = \phi(\xi)$, яка описується т. M_2 у системі координат XOY . Її положення характеризується змінним кутом α , який відповідно до основної формули графічного диференціювання зв'язаний з $\eta(\xi)$, залежністю:

$$\frac{d\eta}{d\xi} = tg\alpha \quad (8)$$

Зазначена умова означає, що лісоматеріал є нерозтяжним тілом і проекції векторів швидкостей точок M_1 і M_2 на напрям M_1M_2 рівні між собою, тобто матиме місце залежність:

$$\dot{\xi} \cdot \cos \alpha + \dot{\eta} \cdot \sin \alpha = \dot{x} \cdot \cos \alpha + \dot{y} \cdot \sin \alpha \quad (9)$$

Залежність (9) можна отримати виходячи із умови плоско паралельного руху тіла про те, що швидкості двох його точок зв'язані між собою:

$$\bar{v}_{M_1} = \bar{v}_{M_2} + \bar{v}_{M_2M_1}, \quad (10)$$

де $|\bar{v}_{M_2M_1}| = l \cdot \dot{\alpha}$,
 або

$$|v_{M_1M_2}| = \dot{y} \cdot \cos \alpha - \dot{x} \cdot \sin \alpha \quad (10')$$

Записавши векторну рівність (10) в проекціях на напрям перпендикулярний до напрямку M_1M_2 , отримаємо основне рівняння кінематики трелювальної системи:

$$\dot{y} \cdot \cos \alpha - \dot{x} \cdot \sin \alpha = l\dot{\alpha} \quad (11)$$

або

$$dy \cdot \cos \alpha - dx \cdot \sin \alpha = l \cdot d\alpha$$

Отримане рівняння має вигляд рівняння Ріккати, яке не завжди може бути проінтегроване в квадратурах [13], крім випадків руху точки M_1 трелювальної системи прямолінійною траєкторією або траєкторією у вигляді дуги кола.

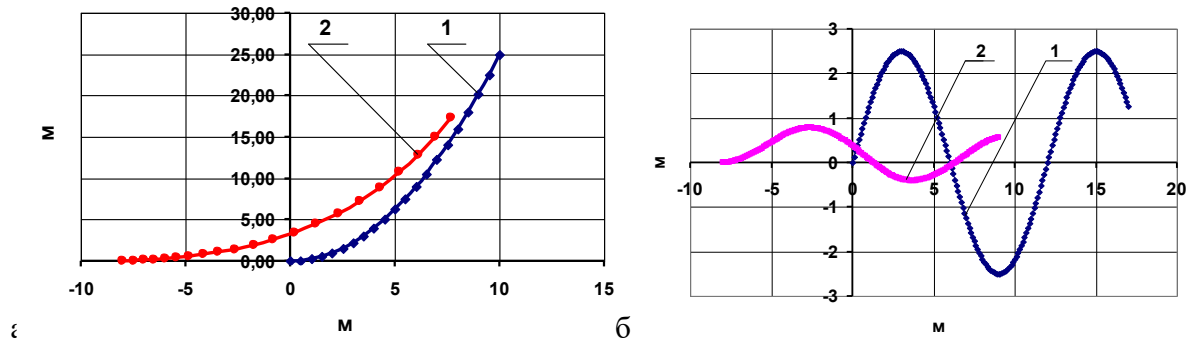
Якщо вважати, що під час руху трелювальної системи, координати x і y зростатимуть, а саме $dx \geq 0, dy \geq 0$, то в будь-який момент часу $d\alpha \geq 0$. Тобто, кут α в процесі руху зростатиме. Щоб встановити до якого значення відбудуватиметься його зростання, скористаємося геометричним змістом похідної з врахуванням, що $y' = tg\beta$:

$$ld\alpha = \frac{\sin(\beta-\alpha)}{\cos \beta} \cdot dx, \quad (12)$$

Отже, в процесі руху точки M_1 трелювальної системи, її ордината зростатиме, тобто $tg\beta \geq 0$, а значення кута α , наблизатиметься до кута β , залишаючись при цьому меншим від нього. Це твердження стосується лише випадків, коли рух точки M_1 трелювальної системи, здійснюється траєкторією для якої $y' \geq 0$ при всіх $x \geq 0$. Якщо рух відбувається траєкторією похідна y' якої змінює знак, то змінюватиме знак і $d\alpha$. Тобто, в положенні у якому $d\alpha$ змінює знак, кут α матиме максимальне значення: α_{max}

– лінія осі сортименту співпадає з дотичною до траєкторії руху початкової точки M_1 трелювальної системи.

Точні аналітичні розв'язки рівняння (11), вдалося отримати за умови руху передньої точки M_1 трелювальної системи прямою або дугою кола [12]. Для випадків руху більш складними траєкторіями, такими як парабола чи синусоїда, розв'язки рівняння (11), отримано шляхом застосування чисельних методів, зокрема методу Ейлера, що дозволило будувати відповідні траєкторії (рис.4) руху кінцевих точок трелювальної системи. відповідно до вихідних даних.



1, 2 – траєкторії руху початкової і кінцевої точок трелювальної системи

Рис. 4. Траєкторії крайніх точок малогабаритної трелювальної системи під час її руху параболою та синусоїдою відповідно

Для комп'ютерного моделювання процесу трелювання деревини в лісовому насадженні, була розроблена блок-схема алгоритму роботи програми (рис.5).

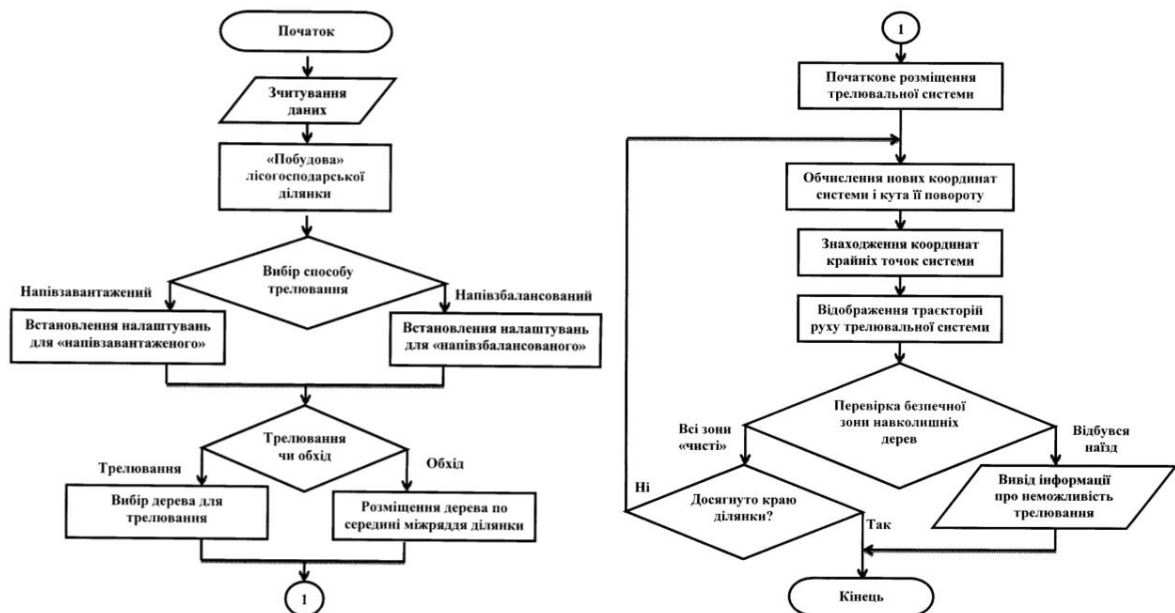


Рис. 5. Блок-схема алгоритму комп'ютерної моделі процесу трелювання

Реалізація алгоритму на основі розробленої моделі лісового насадження та математичної моделі кінематики малогабаритної трелювальної системи, дозволила візуалізувати процес трелювання деревини, що по суті є симуляцією даного процесу. До уваги було взято два основних способи трелювання: в напів завантаженому стані та в напів збалансованому стані або з використанням причепа, зважаючи на те, що кожний із цих способів є актуальним для поштучного трелювання лісоматеріалів.

Робота програми симуляції процесу трелювання складається із двох етапів: введення вхідних даних та візуального відображення процесу переміщення трелювальної системи. Вхідні дані вводяться на відповідній панелі (рис.6) і містять інформацію про насадження, спосіб трелювання, кут та напрямок зрізання дерев, габаритні розміри трелювальної системи і для зручності – вибір швидкості руху трелювальної системи.

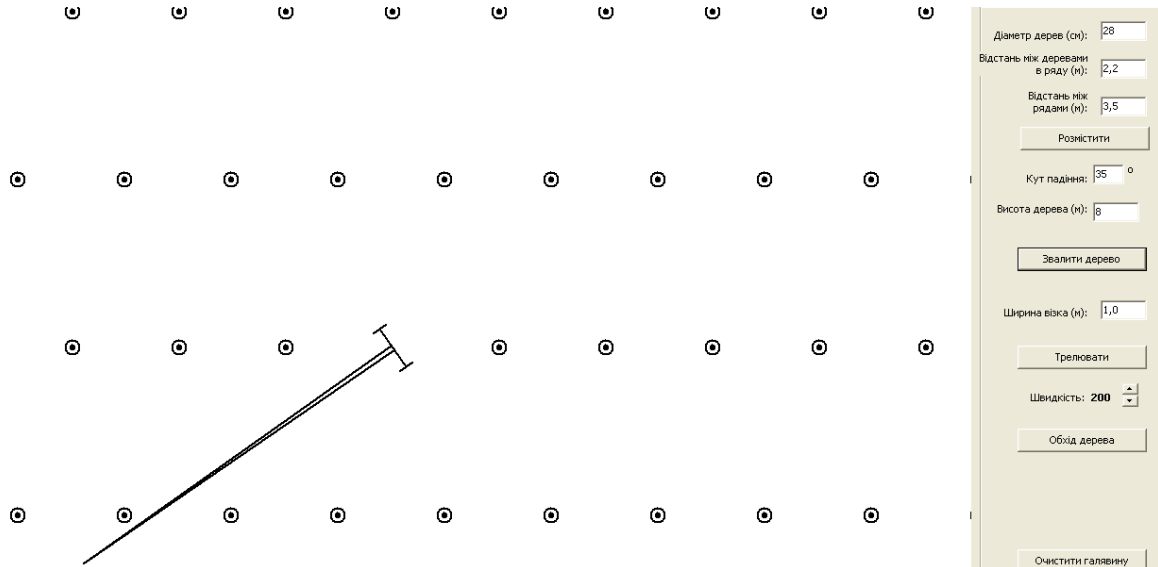


Рис. 6. Генерування моделі насадження та розміщення трелювальної системи

Після введення даних про лісове насадження, які включають відстань між рядами дерев, відстань між деревами в ряду та середній діаметр дерева при основі, слід також ввести діапазон відхилення розміщення дерев від зазначеної схеми їх розміщення. В цьому діапазоні, програма виконує зміщення дерев у випадковому порядку на випадкову відстань. Чим забезпечується елемент випадковості необхідний для використання програми в експериментальному дослідженні. По завершенню введення зазначених даних на екрані генерується модель лісового насадження з відповідними параметрами (рис.6), які найбільше впливають на кінематику трелювальної системи.

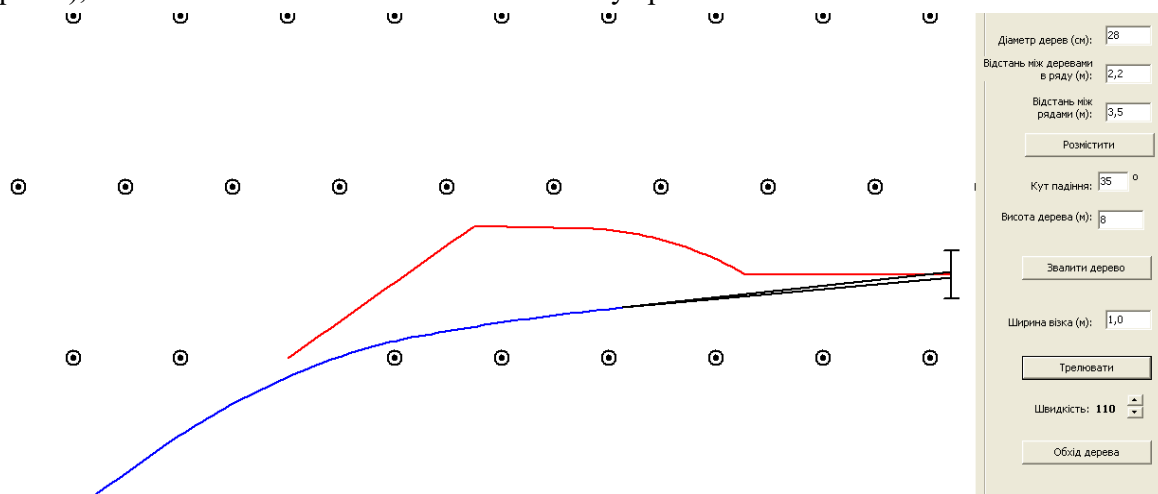


Рис.7. Візуалізація переміщення трелювальної системи в лісовому насадженні

Після цього, вводяться дані, які стосуються способу трелювання та параметрів трелювальної системи. В програмі закладено два способи трелювання лісоматеріалу: в

напів завантаженому стані та в напів збалансованому стані, які залежать від місця розміщення причіпного трелювального засобу. Трелювання в напів завантаженому стані може виконуватися і без причіпного трелювального засобу. Довжина трелювальної системи в програмі, відповідає довжині лісоматеріалу, а ширина вводиться відповідно до ширини тягача. Початкове положення лісоматеріалу, а відповідно і розміщення трелювальної системи, визначається кутом падіння зрізаних дерев, який також необхідно ввести, спираючись на технологічні особливості рубки. Ввівши зазначені дані та давши команду на запуск, на екрані з'являється трелювальна система у місці вибраного для зрізання дерева (рис.6).

Давши команду на початок руху трелювальної системи, на екрані візуалізується її переміщення із відображення в кольорі траєкторій руху початкової та кінцевої її точок (рис.7). Якщо задана у вихідних даних довжина трелювальної системи є надто великою та унеможливує її рух в згенерованому насадженні, це відображається на екрані (рис.8). Після цього, слід змінити схему розміщення дерев чи зменшити габаритні розміри трелювальної системи або змінити спосіб трелювання.

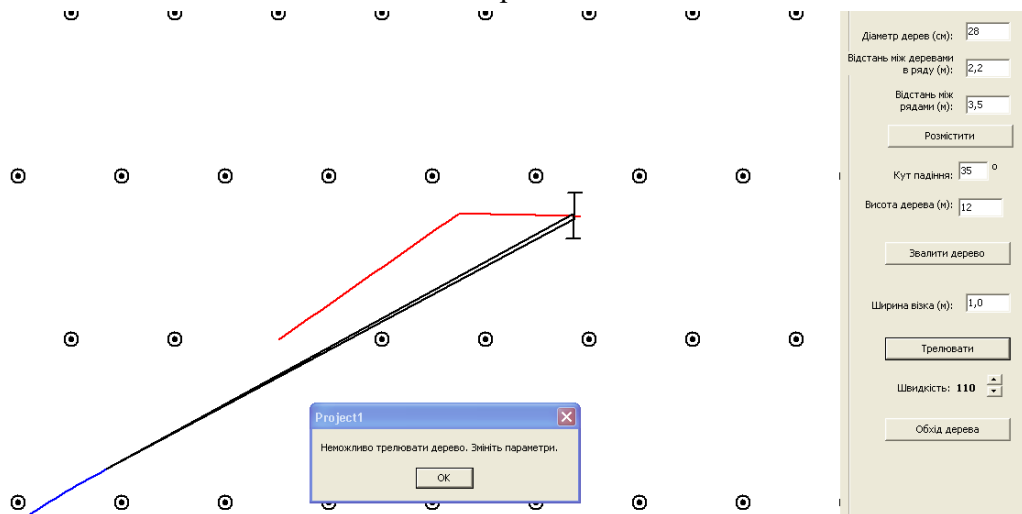


Рис. 8. Повідомлення про невідповідність розмірів трелювальної системи параметрам лісового насадження

Така програма симуляції процесу трелювання, може використовуватися, як в процесі експериментального дослідження, так і на практиці під час планування лісосічних робіт, особливо на етапі вибору системи лісосічних машин.

Обговорення

Моделювання є важливою складовою наукового підходу до розв'язку проблеми, що ґрунтується на глибоких знаннях про об'єкт та предмет дослідження і використанні математичного апарату. Сучасний етап розвитку цифрових технологій, дозволяє візуалізувати математичні моделі в динаміці, розробляючи програмний код для симуляції процесу чи явища з високою точністю та елементами випадковості і непередбачуваності. Використання комп'ютерної симуляції стає одним із найбільш доступних та дешевих засобів дослідження, що розкриває широкі можливості.

В структурі основних лісосічних робіт, трелювання деревини є однією із операцій де доцільно використовувати комп'ютерне моделювання для симуляції та в процесі дослідження, що в реальних умовах потребує використання значних коштів, часу та не завжди отримані результати задовольняють умови експерименту. Чим більшу кількість чинників, які впливають на процес враховуються в симуляційній моделі, тим повніше відобразатимуться реальні умови і достовірнішими будуть результати.

Розроблені в роботі моделі симуляції процесу трелювання деревини, враховують основні, як змінні так і не змінні чинники, що впливають на кінематику та параметри малогабаритної трелювальної системи і можуть використовуватися для проведення дослідження згідно плану експерименту для рівнинних умов.

Висновки

1. Зважаючи, що більше половини лісів України є штучно створені [11], то за основу під час розроблення моделі лісового насадження, вибрано штучно створене насадження із розміщенням дерев рядами, що найбільш характерне для рівнинних лісів.

2. Аналіз тематичних наукових публікацій, свідчить про не достатньо висвітлені причини механічних пошкоджень дерев в насадженні під час трелювання деревини.

3. Вказано, що однією із основних причин механічних пошкоджень дерев зазвичай є лісоматеріал, що третється об дерево під час повороту трелювальної системи, тому важливо прогнозувати траєкторію переміщення кінцевої точки трелювальної системи для уникнення зіткнення із деревами на площі.

3. Отримане основне рівняння кінематики, дійсне для випадку трелювання одиничного лісоматеріалу такого поперечного січення, що дозволяє його вважати абсолютно жорстким не розтяжним тілом циліндричної форми.

4. Комп'ютерна симуляція процесу трелювання, розширює можливості експериментальних досліджень та знайде практичне застосування на виробництві.

Список використаних джерел

1. Цимбалюк Ю.І. Чисельна реалізація математичної моделі транспортування круглого лісоматеріалу під наметом лісу [Текст] / Ю. І. Цимбалюк, О.І. Думанський // Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук.-техн. праць. – Львів: ПВБ НЛТУ України, 2011. – Вип. 21.18 – С. 305–310. https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2011/21_18/index.htm

2. E. Ampoorter, P. De Frenne, M. Hermy, K. Verheyen. Effects of soil compaction on growth and survival of tree saplings: A meta-analysis. *Basic and Applied Ecology*. Volume 12, Issue 5, August 2011, Pages 394-402. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2011.06.003>

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. D'Acqui, L. P., Certini, G., Cambi, M., & Marchi, E. (2020) Machinery's impact on forest soil porosity. *Journal of Terramechanics*. Volume 91, October 2020, Pages 65-71. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2020.05.002>

5. 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>

6. Enrico Marchi, Rodolfo Picchio, Raffaele Spinelli, Stefano Verani, Rachele Venanzi, Giacomo Certini. Environmental impact assessment of different logging methods in pine forests thinning. *Ecological Engineering*. Volume 70, September 2014, Pages 429-436. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.06.019>

7. R.E. Gullison, J.J. Hardner. The effects of road design and harvest intensity on forest damage caused by selective logging: empirical results and a simulation model from the Bosque Chimanes, Bolivia. *Forest Ecology and Management*. Volume 59, Issues 1-2, June 1993, Pages 1-14. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(93\)90067-W](https://doi.org/10.1016/0378-1127(93)90067-W)

8. Raffaele Spinelli, Natascia Magagnotti, Rub. An alternative skidding technology to the current use of crawler tractors in Alpine logging operations. *Journal of Cleaner Production*. Volume 31, August 2012, Pages 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.02.033>
9. Proto, A. R., Bernardini, V., Cataldo, M. F., & Zimbalatti, G. (2020). Whole tree system evaluation of thinning a pine plantation in southern Italy. *Annals of Silvicultural Research*, 45(1), 44–52. <https://doi.org/10.12899/asr-1849>
10. 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>
11. Державний комітет лісового господарства України. Лісове господарство України. – К.: «Видавничий дім «ЕКО – інформ», 2010. – 64с.
12. Цимбалюк Ю.І. Кінематика малогабаритної трелювальної системи траєкторією у вигляді дуги кола. [Текст] /Ю. І. Цимбалюк// Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів: науковий журнал. – Харків, 2025, №26 – С. 36-44. <https://doi.org/10.64165/journal-ts.2025.26.36-44>
13. Самойленко А. М.; Кривошея С.А.; Перестюк М. О. (1994). Диференціальні рівняння у прикладах і задачах (PDF). Київ: Вища школа. с. 455.

References

1. Tsybalyuk Yu.I. Numerical implementation of a mathematical model of roundwood transportation under a forest canopy [Text] / Yu. I. Tsybalyuk, O.I. Dumansky // Scientific Bulletin of the NLTU of Ukraine: Collection of Scientific and Technical Works – Lviv: RVV NLTU of Ukraine, 2011. – Issue 21.18 – P. 305–310. https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2011/21_18/index.htm
2. E. Ampoorter, P. De Frenne, M. Hermy, K. Verheyen. Effects of soil compaction on growth and survival of tree saplings: A meta-analysis. *Basic and Applied Ecology*. Volume 12, Issue 5, August 2011, Pages 394-402. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2011.06.003>
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. D'Acqui, L. P., Certini, G., Cambi, M., & Marchi, E. (2020) Machinery's impact on forest soil porosity. *Journal of Terramechanics*. Volume 91, October 2020, Pages 65-71. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2020.05.002>
5. 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>
6. Enrico Marchi, Rodolfo Picchio, Raffaele Spinelli, Stefano Verani, Rachele Venanzi, Giacomo Certini. Environmental impact assessment of different logging methods in pine forests thinning. *Ecological Engineering*. Volume 70, September 2014, Pages 429-436. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.06.019>
7. R. E. Gullison, J.J. Hardner. The effects of road design and harvest intensity on forest damage caused by selective logging: empirical results and a simulation model from the Bosque Chimanes, Bolivia. *Forest Ecology and Management*. Volume 59, Issues 1-2, June 1993, Pages 1-14. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(93\)90067-W](https://doi.org/10.1016/0378-1127(93)90067-W)
8. Raffaele Spinelli, Natascia Magagnotti, Rub. An alternative skidding technology to the current use of crawler tractors in Alpine logging operations. *Journal of Cleaner Production*. Volume 31, August 2012, Pages 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.02.033>

9. Proto, A.R., Bernardini, V., Cataldo, M.F., & Zimbalatti, G. (2020). Whole tree system evaluation of thinning a pine plantation in southern Italy. *Annals of Silvicultural Research*, 45(1), 44–52. <https://doi.org/10.12899/asr-1849>

10. 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>

11. State Forestry Committee of Ukraine. *Forestry of Ukraine*. – Kyiv: “Publishing House “EKO – Inform”, 2010. – 64p.

12. Tsymbalyuk Y.I. Kinematics of a small-sized skidding system with a trajectory in the form of an arc of a circle. [Text] /Yu. I. Tsymbalyuk// *Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes: scientific journal*. – Kharkiv, 2025, No. 26 – P. 36-44. <https://doi.org/10.64165/journal-ts.2025.26.36-44>

13. Samoilenko A. M.; Kryvosheya S. A.; Perestyuk M. O. (1994). *Differential equations in examples and problems (PDF)*. Kyiv: Vyscha shkola. p. 455.