

Цимбалюк Ю. І.

Національний
лісотехнічний університет
України, м. Львів, Україна

E-mail:

yu.tsymbalyuk@nltu.edu.ua

**КІНЕМАТИКА МАЛОГАБАРИТНОЇ
ТРЕЛЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ
ТРАЄКТОРІЄЮ У ВИГЛЯДІ ДУГИ КОЛА**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-36-44>

УДК 630*375:[514.85+629.3.012]

Цимбалюк Ю.І. Кінематика малогабаритної трелювальної системи траєкторією у вигляді дуги кола.

Анотація. Дослідження стосується процесу трелювання деревної сировини під час проведення рубок формування та оздоровлення лісових насаджень із застосуванням міні трелювальних засобів, до прикладу, міні скідерів повідкового типу. Вибрано умови трелювання одиничного круглого лісоматеріалу в напівзавантаженому стані в рівнинних умовах. Мета дослідження полягає в математичному описі кінематики кінцевих точок міні трелювальної системи під час її руху траєкторією у вигляді дуги кола. Теоретичне дослідження виконувалося шляхом математичного моделювання з використанням основних положень теоретичної механіки та фізичних особливостей предмету праці. Враховано спосіб трелювання та маневрові можливості трелювального засобу. Математична модель передбачає врахування основних параметрів лісового насадження, зокрема схеми розміщення дерев та їх середнього діаметру у відземковій частині. Результатом виконаного дослідження є отримані рівняння та математичні залежності, які дозволяють будувати траєкторію переміщення кінцевої точки трелювальної системи за умови відомого рівняння траєкторії руху її початкової точки.

Ключові слова: круглий лісоматеріал, міні трелювальна система, трелювальний засіб, міні скідер, кінематика трелювальної системи.

Tsymbalyuk Yu.I. Kinematics of small-sized skidding system with trajectory in form of arc of circle.

Abstract. The study concerns the process of skidding of wood raw materials during felling, formation and rehabilitation of forest stands using mini skidding devices, for example, mini skidders of the leash type. The conditions for skidding of a single round timber in a half-loaded state in flat conditions were selected. The purpose of the study is to mathematically describe the kinematics of the endpoints of the mini skidding system during its movement along a trajectory in the form of an arc of a circle. The theoretical study was carried out by mathematical modeling using the basic principles of theoretical mechanics and the physical characteristics of the subject of work. The skidding method and maneuverability of the skidding device were taken into account. The mathematical model assumes consideration of the main parameters of the forest stand, in particular the layout of trees and their average diameter in the clearing part. The result of the research is the obtained equations and mathematical dependencies, which allow building the trajectory of movement of the end point of the skidding system, provided that the equation of the trajectory of movement of its starting point is known.

Key words: round timber, mini skidding system, skidding tool, mini skidder, skidding system kinematics.

Постановка проблеми

Більше половини річних об'ємів лісозаготівлі в Україні приходить на деревину, яка отримується внаслідок виконання заходів з формування і оздоровлення лісових насаджень [1]. При цьому весь комплекс лісосічних робіт приходить виконувати під наметом лісового насадження, включно із трелюванням деревини. Як показують дослідження, під час трелювання круглих лісоматеріалів в лісовому насадженні, відбуваються механічні пошкодження стовбурів дерев, які залишаються на площі. В основному, такі пошкодження наносяться саме задньою частиною вантажу, під час повороту трелювальної системи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Усвідомлення того, що трелювання деревини спричиняє досить негативний вплив на лісове середовище, актуалізує пошук шляхів мінімізації негативних наслідків зазначеної операції основних лісосічних робіт. Так, зокрема, відбувається заміна потужної трелювальної техніки, трелювальними машинами та агрегатами невеликої потужності, особливо під час освоєння лісових площ з невеликими запасами деревини. Дослідження, які виконуються в цьому напрямку підтверджують вищі показники екологічності у випадку використання міні трелювальної техніки та механізованих трелювальних засобів.

Так, зокрема дослідження [2], стосується перспективи застосування колісного міні-скідера на операції трелювання деревини під час виконання рубки прорідження та відновлювальної рубки. Метою даного дослідження було отримання таких важливих даних як продуктивність, енерговитрати, а також викиди парникових газів під час роботи міні-скідера. Отримані результати показали, що такі механізовані трелювальні засоби, здатні повною мірою замінити, використовувані до цього колісні сільськогосподарські та лісгосподарські трактори, особливо в контексті дрібного лісового господарства. Зокрема, їх перевагою є суттєве зменшення споживання енергії та викидів парникових газів в атмосферу. При цьому встановлена продуктивність колісного міні-скідера, в залежності від виду рубки, коливається в проміжку від 3,2м³/год до 4,95м³/год.

Дослідження [3], також стосується енерговитрат та видів відпрацьованих газів під час виконання механізованих операцій лісосічних робіт. Спектр досліджуваної лісозаготівельної техніки включав як бензиномоторні пили так і техніку із дизельними двигунами. При цьому виконувався аналіз екологічності різних видів пального, включно із біопальним та два типи мастильних олив на мінеральній та рослинній основах. В результаті встановлено, що найбільше шкідливих викидів продукується внаслідок використання дизельного пального екологічного класу 3.

Під час трелювання деревини у вигляді круглих лісоматеріалів певної довжини в лісовому насадженні, зокрема під час виконання рубок із наявністю дерев, які залишаються на площі, відбуваються різні механічні пошкодження стовбурів ростучих дерев. Це в подальшому сприяє розвитку хвороб та часто загибелі дерев. Цій проблематиці присвячена праця [4], де автор досліджує запропоноване обладнання до лебідки, яке дозволяє зменшувати кількість пошкоджених дерев на площі під час трелювання стовбурної деревини. Зокрема, таке обладнання дозволяє скоротити частоту пошкоджень із 50% до 36%.

Пошкодженню дерев, що залишаються на площі, внаслідок виконання лісосічних робіт, стосується і дослідження [5]. Тут ця проблематика піднімається в більш широкому плані. Зокрема, звертається увага, що під час зрізання дерев і їх падінні, також відбуваються механічні пошкодження різної тяжкості, стовбурів залишених на площі дерев в межах 12-14%. У випадку використання гусеничних тракторів для трелювання деревини, цей відсоток зростає до 20%. При цьому відбувається порушення лісових ґрунтів на площі ділянки, що в сумарному обсязі становить 58%, а більш серйозне пошкодження поверхні ґрунту, включно із руйнуванням поверхневого шару, складає 42%. Авторами відмічається, що застосування гусеничної трелювальної техніки, призводить до більшого руйнування як лісового ґрунту так і дерев на площі.

Під час виконання вибіркового рубок відбувається пошкодження ростучих на площі дерев не тільки внаслідок зрізання вибраних дерев, але і під час трелювання деревини [6]. Тобто, відбувається так зване вторинне пошкодження дерев. Особливо інтенсивно пошкоджуються дерева, як зазначають автори, обабіч трелювального шляху в місці його повороту. При цьому зазначається, що за меншої інтенсивності рубки, кількість пошкоджених дерев зростає. Авторами запропонована імігаційна модель, що дозволяє планувати трелювальні шляхи на площі лісосіки з метою зменшення пошкодження дерев під час трелювання деревини.

Дослідження [7] стосується пошуку альтернативних технологій трелювання деревини в заміну нинішнього використання гусеничної техніки. Автором пропонується використовувати в приватних лісових господарствах міні трелювальний трактор з гумовими шинами на заміну шкідливим гусеничним трелювальним машинам. Показано, що таке нововведення дозволяє скоротити витрати на трелювання деревини від 30% до 50%. Тобто, в грошовому еквіваленті, витрати зменшилися із 19...47 євро/м³ до 13...23 євро/м³. При середній відстані трелювання в межах 130м. Така заміна трелювальної техніки виявилася корисною як з точки зору навколишнього середовища, так і з точки зору безпеки праці.

Формулювання мети досліджень

У випадку застосування на трелюванні деревини міні скідерів, що вільно переміщуються між деревами в насадженні, наближено, довжина трелювальної системи визначатиметься довжиною лісоматеріалу. Таке припущення впливає з того, що міні скідер майже повністю знаходиться під передньою частиною лісоматеріалу, наприклад, при трелюванні в напів або повністю завантаженому стані. Під час виконання поворотів чи маневрування між деревами, оператор вибирає траєкторію руху для передньої точки міні трелювальної системи, по якій і переміщується механізований трелювальний засіб (міні скідер), до прикладу, повідкового типу. Однак при таких поворотах, оператор не може передбачити траєкторію переміщення її кінцевої точки, якою є задня частина лісоматеріалу що вільно ковзає по опорній поверхні. Якщо довжина лісоматеріалу є значною, то зазвичай його задня частина стикається із стовбурами дерев обабіч вибраної смуги трелювання завдаючи механічних пошкоджень різної тяжкості.

Виходячи із зазначеного, метою даного дослідження є математичне обґрунтування повороту міні трелювальної системи, який найчастіше виконується у вигляді дуги кола з отриманням рівняння, що описує траєкторію кінцевої точки трелювальної системи, яку наближено приймаємо як довжину лісоматеріалу. Це дозволить моделювати кінематику трелювальної системи під час її повороту, враховуючи, зокрема, середню відстань між деревами на площі.

Очевидно, що задачі такого характеру, доцільно розв'язувати із застосуванням математичного апарату та основних законів фізики і теоретичної механіки. Таким чином, міні трелювальну систему розглядатимемо, як нерозтяжний стержень певної довжини, що виконує плоско паралельний рух в прямокутній системі координат. Інерційними силами при цьому нехтуємо. Також, виходимо з того, що рівняння кінематики передньої частини стержня відоме, а задньої частини, що вільно ковзає по площині слід отримати.

Результати досліджень

Якщо вважати, що поворот міні трелювальної системи зазвичай виконується траєкторією у вигляді дуги кола, то слід розглядати два можливих при цьому випадки. Перший випадок, стосується умов повороту за яких радіус дуги кола є більший за загальну довжину трелювальної системи. І відповідно, другий випадок має стосуватися умов, коли загальна довжина трелювальної системи є більша за радіус дуги кола.

Для математичного опису першого випадку, прийmemo, що початкова точка міні трелювальної системи (т. M_1), знаходиться на механізованому трелювальному засобі, що виконує поворот дугою кола (рис. 1):

$$x = l + R \cdot \sin \omega t, \quad y = R - R \cdot \cos \omega t + \frac{d+b_0}{2}, \quad (1)$$

$$\dot{x} = R\omega \cdot \cos \omega t, \quad \dot{y} = R\omega \cdot \sin \omega t, \quad (2)$$

Використовуючи рівняння кінематики круглого лісоматеріалу [8, 9], запишемо:

$$l\dot{\alpha} = R\omega \cdot (\sin \omega t \cdot \cos \alpha - \cos \omega t \cdot \sin \alpha) = R\omega \cdot \sin(\omega t - \alpha) \quad (3)$$

Якщо припустити, що кутова швидкість $\omega = const$ то можна записати (3) як:

$$l \cdot (\omega t - \alpha) - l\omega = -R\omega \cdot \sin(\omega t - \alpha), \quad (4)$$

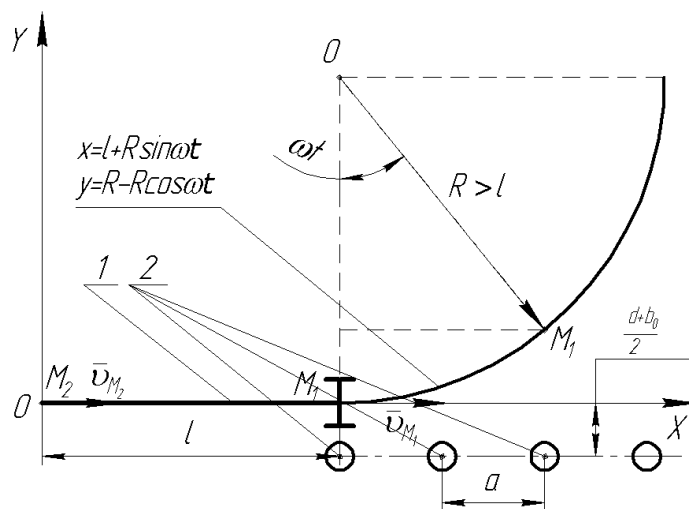


Рис. 1. Розрахункова схема повороту міні трелювальної системи дугою кола для випадку коли $l \leq R$: 1 – міні трелювальна система; 2 – дерева

$$l \cdot (\omega t - \alpha) = \omega R (-\sin(\omega t - \alpha) + \frac{l}{R}). \quad (5)$$

Позначимо $\omega t - \alpha = z$ і виконаємо спрощення:

$$\frac{dz}{n - \sin z} = \frac{\omega R}{l} dt = \frac{\omega}{n} dt \quad (6)$$

В результаті інтегрування рівняння (6) за умови $\frac{l}{R} = n \leq 1$, отримаємо:

$$\frac{1}{\sqrt{1-n^2}} \cdot \ln \frac{n \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2} + 1 - \sqrt{1-n^2}}{n \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2} + 1 + \sqrt{1-n^2}} = \frac{\omega t}{n} + \ln C_3 \quad (7)$$

$$\ln \frac{n \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2} + (1 - \sqrt{1-n^2})}{n \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2} + (1 + \sqrt{1-n^2})} = \frac{\sqrt{1-n^2} \cdot \omega t}{n} + \sqrt{1-n^2} \cdot \ln C_3 \quad (8)$$

Щоб визначити C_3 , приймаємо умову, що $t = 0$; $z = 0$.

$$\ln \frac{1 - \sqrt{1-n^2}}{1 + \sqrt{1-n^2}} = \sqrt{1-n^2} \cdot \ln C_3; \quad (9)$$

$$\ln C_3 = \frac{1}{\sqrt{1-n^2}} \cdot \ln \frac{1 - \sqrt{1-n^2}}{1 + \sqrt{1-n^2}} \quad (10)$$

Тоді рівність (8) можна звести до вигляду:

$$\ln \frac{n \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2} + (1 - \sqrt{1-n^2})}{n \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2} + (1 + \sqrt{1-n^2})} = \ln e^{\frac{\sqrt{1-n^2}}{n} \cdot \omega t} + \ln \frac{1 - \sqrt{1-n^2}}{1 + \sqrt{1-n^2}} \quad (11)$$

Використаємо позначення $\frac{1 - \sqrt{1-n^2}}{1 + \sqrt{1-n^2}} = A$. Тоді із (11), отримаємо:

$$\frac{n \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2} + (1 - \sqrt{1-n^2})}{n \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2} + (1 + \sqrt{1-n^2})} = e^{A \cdot \frac{\sqrt{1-n^2}}{n} \cdot \omega t} \quad (12)$$

Якщо позначити $A \cdot \frac{\sqrt{1-n^2}}{n} \cdot \omega = \gamma$, можна записати:

$$\begin{aligned} n \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2} + (1 - \sqrt{1-n^2}) &= (n \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2} + (1 + \sqrt{1-n^2})) \cdot e^\gamma, \\ n \cdot (e^\gamma - 1) \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2} &= \left[(1 - \sqrt{1-n^2}) - (1 + \sqrt{1-n^2}) \cdot e^\gamma \right] = \\ &= (1 - e^\gamma) - \sqrt{1-n^2} \cdot (1 + e^\gamma) \end{aligned} \quad (13)$$

Звідки

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \frac{z}{2} &= \frac{1}{n \cdot (e^\gamma - 1)} \cdot \left[(1 - e^\gamma) - \sqrt{1-n^2} \cdot (1 + e^\gamma) \right] \\ \operatorname{tg} \frac{z}{2} &= \frac{-1 + \sqrt{1-n^2} \cdot \frac{1 + e^\gamma}{1 - e^\gamma}}{n} \end{aligned}$$

$$z = 2 \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{1-n^2} \cdot \frac{1+e^\gamma}{1-e^\gamma} - 1}{n} = \omega t - \alpha \quad (14)$$

Таким чином, в будь-який момент руху, коли $t \geq 0$ буде:

$$\alpha = \omega t - 2 \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{1-n^2} \cdot \frac{1+e^\gamma}{1-e^\gamma} - 1}{n}, \quad (15)$$

де $\gamma = \frac{\sqrt{1-n^2}}{n} \cdot \frac{1-\sqrt{1-n^2}}{1+\sqrt{1-n^2}} \cdot \omega$, $n = \frac{l}{R} \leq 1$

Використовуючи (15) для умови $n = \frac{l}{R} \leq 1$, та задаючи значення $0 \leq \varphi \leq 2\pi$,

можна отримати відповідні значення кута α , який дозволяє розраховувати координати кінцевої точки M_2 міні трелювальної системи для побудови її траєкторії.

У випадку коли виникає необхідність виконувати поворот міні трелювальної системи траєкторією у вигляді дуги кола, радіус R якої менший довжини l трелювальної системи (рис. 2), то кінематику початкової точки M_1 , можна виразити рівняннями:

$$\begin{cases} x = R \cdot \sin \omega t + x_0, \\ y = R - R \cdot \cos \omega t + \frac{d+b_0}{2}. \end{cases} \quad (16)$$

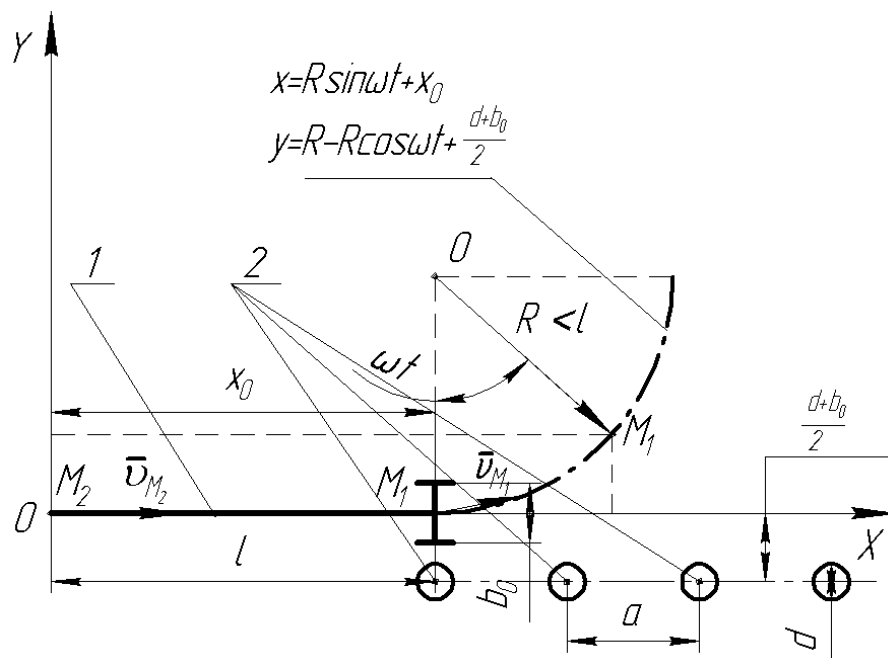


Рис. 2. Розрахункова схема кінематики міні трелювальної системи дугою кола за умови коли $l \geq R$: 1 – міні трелювальна система; 2 – дерева

Відповідно буде:

$$\begin{cases} \dot{x}=R\omega\cdot\cos\omega t, \\ \dot{y}=R\omega\cdot\sin\omega t. \end{cases} \quad (17)$$

Аналогічно, використовуючи отримане рівняння кінематики [8], [9], буде:

$$l\dot{\alpha}=R\omega\cdot\sin(\omega t-\alpha) \quad (18)$$

Позначимо $\omega t-\alpha=z$, і тоді $\dot{\alpha}=\omega-\dot{z}$. Відповідно із (18), отримаємо:

$$l\dot{z}=l\omega-R\omega\cdot\sin z=\omega\cdot(l-R\cdot\sin z), \quad (19)$$

звідки

$$\frac{dz}{l-R\cdot\sin z}=\frac{\omega}{l}dt. \quad (20)$$

Якщо позначити $\frac{R}{l}=k$, то отримаємо

$$\frac{dz}{1-k\cdot\sin z}=\omega dt. \quad (21)$$

Після інтегрування рівняння (21), можна записати:

$$\frac{2}{\sqrt{1-k^2}}\cdot\operatorname{arctg}\frac{\operatorname{tg}\frac{z}{2}-k}{\sqrt{1-k^2}}=\omega t+C, \quad (22)$$

де $k\leq 1$ відповідно до умови $R\leq l$ (рис. 2)

Сталу інтегрування C , слід знаходити для початкових умов, коли: $t=0$, $\alpha=0$, $z=0$.

$$C=-\frac{2}{\sqrt{1-k^2}}\cdot\operatorname{arctg}\frac{k}{\sqrt{1-k^2}}. \quad (23)$$

Із рівності (22) можна отримати:

$$\operatorname{arctg}\frac{\operatorname{tg}\frac{z}{2}-k}{\sqrt{1-k^2}}+\operatorname{arctg}\frac{k}{\sqrt{1-k^2}}=\frac{\sqrt{1-k^2}\cdot\omega t}{2}. \quad (24)$$

Після перетворень, рівність набуде такого вигляду:

$$\operatorname{arctg}\frac{\operatorname{tg}\frac{z}{2}-k}{\sqrt{1-k^2}}+\operatorname{arctg}\frac{k}{\sqrt{1-k^2}}=\operatorname{arctg}\frac{\frac{1}{\sqrt{1-k^2}}\cdot\operatorname{tg}\frac{z}{2}}{\frac{k\cdot(\operatorname{tg}\frac{z}{2}-k)}{1-\frac{(\operatorname{tg}\frac{z}{2}-k)^2}{(\sqrt{1-k^2})^2}}}=\operatorname{arctg}\frac{\sqrt{1-k^2}\cdot\operatorname{tg}\frac{z}{2}}{1-k\cdot\operatorname{tg}\frac{z}{2}}, \quad (25)$$

Обговорення

Із рівності (24):

$$\operatorname{arctg}\frac{\sqrt{1-k^2}\cdot\operatorname{tg}\frac{z}{2}}{1-k\cdot\operatorname{tg}\frac{z}{2}}=\frac{\sqrt{1-k^2}\cdot\omega t}{2}, \quad (26)$$

Звідки

$$\frac{\sqrt{1-k^2} \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2}}{1-k \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2}} = \operatorname{tg} \frac{\sqrt{1-k^2} \cdot \omega t}{2} \quad (27)$$

і тоді

$$\operatorname{tg} \frac{z}{2} = \frac{\operatorname{tg} \frac{\sqrt{1-k^2} \cdot \omega t}{2}}{\sqrt{1-k^2} + k \cdot \operatorname{tg} \frac{\sqrt{1-k^2} \cdot \omega t}{2}} = \frac{1}{k} \cdot \frac{\operatorname{tg} \frac{\sqrt{1-k^2} \cdot \omega t}{2}}{\sqrt{\frac{1-k^2}{k^2} + \operatorname{tg} \frac{\sqrt{1-k^2} \cdot \omega t}{2}}} \quad (28)$$

Для даного випадку, коли $l \geq R$, слід зазначити, що вихід міні трелювальної системи з колової траєкторії на прямолінійну, потрібно виконувати в точці де дотична до колової дуги, складатиме з віссю Ox кут β для якого $\operatorname{tg} \beta = \frac{\dot{y}}{\dot{x}} = \operatorname{tg} \omega t = \operatorname{tg} \varphi$, а отже $\beta = \varphi$. При цьому, координати точки виходу на прямолінійну траєкторію, виражатимуться: $x = R \cdot \sin \varphi + x_0$, $y = R \cdot (1 - \cos \varphi) + \frac{d+b_0}{2}$.

Висновки

1. Отримані в даному дослідження математичні залежності, дозволяють будувати траєкторії кінематики крайніх точок міні трелювальної системи під час її повороту кривою у вигляді дуги кола;
2. Коли переміщення міні трелювальної системи відбувається дугою кола за умови $R \leq l$, то максимальний кут дуги повороту складатиме 90° ; якщо кут повороту матиме більше 90° , переміщення кінцевої точки міні трелювальної системи відбуватиметься не по дузі, а відповідно і подальший рух по такій коловій дузі буде неможливий;
3. Кінематику коловою дугою за умови $l = R$ не розглядається через відсутність стабілізації процесу.

Список використаних джерел

1. Державний комітет лісового господарства України. Лісове господарство України. К.: «Видавничий дім «ЕКО – інформ», 2010. 64с.
2. 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. *Ekological Engineering*. Volume 61, Part A, December 2013, Pages 216-223. <https://doi.org/10.1016/j.2013.09.052>
3. Dimitris Athanassiadis. Energy consumption and exhaust emissions in mechanized timber harvesting operations in Sweden. *Science of the Total Environment*. Volume 225, Issues 1-3, 8 June 2000, Pages 135-143. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00463-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00463-0)
4. Rodolfo Picchio, Natascia Magagnotti, Alessandro Sirna, Raffaele Spinelli. Improved winching technique to reduce logging damage. *Ekological Engineering*. Volume 47, October 2012, Pages 83-86. <https://doi.org/10.1016/j.2012.06.037>
5. Raffaele Spinelli, Natascia Magagnotti, Carla Nati. 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. 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)

7. Raffaella 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>

8. Цимбалюк Ю. І. Математичне обґрунтування процесу транспортування круглого лісоматеріалу під наметом лісу. Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук.-техн. праць. Львів: РВВ НЛТУ України, 2009. Вип. 19.5 С. 288–296.

9. Цимбалюк Ю. І., Думанський О. І. Чисельна реалізація математичної моделі транспортування круглого лісоматеріалу під наметом лісу. Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук.-техн. праць. Львів: РВВ НЛТУ України, 2011. Вип. 21.18. С. 305–310.

References

1. State Committee of Forestry of Ukraine. *Forestry of Ukraine*. Kyiv: "Publishing House "EKO – Inform", 2010. 64p.

2./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. *Ekological Engineering*. Volume 61, Part A, December 2013, Pages 216-223. <https://doi.org/10.1016/j.2013.09.052>

3. Dimitris Athanassiadis. Energy consumption and exhaust emissions in mechanized timber harvesting operations in Sweden. *Science of the Total Environment*. Volume 225, Issues 1-3, 8 June 2000, Pages 135-143. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00463-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00463-0)

4. Rodolfo Picchio, Natascia Magagnotti, Alessandro Sirna, Raffaella Spinelli. Improved winching technique to reduce logging damage. *Ekological Engineering*. Volume 47, October 2012, Pages 83-86. <https://doi.org/10.1016/j.2012.06.037>

5. Raffaella Spinelli, Natascia Magagnotti, Carla Nati. 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. 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)

7. Raffaella 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>

8. Ju.I. Tsybalyuk. Mathematical substantiation of round wood transporting process under the flouts canopy. *Scientific Bulletin of the NLTU of Ukraine: Collection of Scientific and Technical Works*. Lviv: RVV NUFWT of Ukraine, L'viv , 2009. Issue 19.5. Pp. 288–296.

9. Ju.I. Tsybalyuk, O.I. Dumansky Numerical computation of mathematical model of logging of round wood under canopy of the trees. *Scientific Bulletin of the NLTU of Ukraine: Collection of Scientific and Technical Works*. Lviv: RVV NUFWT of Ukraine, L'viv , 2011. Issue 21.18. Pp. 305–310.