

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСТАТКОВАННЯ ТРЕЛЮВАЛЬНИХ ТРАКТОРІВ

Анотація.

У статті вирішено наукове завдання обґрунтування параметрів технологічного устаткування трелювальних тракторів для умов вибіркового рубок формування і оздоровлення лісів на рівнинних територіях. Авторами реалізовано метод EDAS (Evaluation based on Distance from Average Solution) в інтервальному нейтрософському поданні, що дозволяє враховувати ступені істинності, невизначеності та хибності експертних даних. На основі позиційно-пропорційного методу визначено вагові коефіцієнти для 20 експлуатаційних параметрів, серед яких пріоритетними встановлено коефіцієнт використання тягового зусилля та питомі енергетичні витрати. Проведено порівняльний аналіз чотирьох альтернатив технологічного оснащення (A1-A4). Результати моделювання та аналіз чутливості (варіація ваг $\pm 20\%$) підтвердили стабільність ранжування, де найбільш ефективним визначено електрогідравлічний привод з адаптивною системою керування натягом каната ($AS = 0,872$). Впровадження запропонованої методики дозволяє знизити питомі витрати палива на 12-17% та зменшити пошкодження ґрунтового покриття до 20%.

Ключові слова: трелювальний трактор, технологічне устаткування, метод EDAS, нейтрософські множини, вибіркові рубки, енергоефективність.

М. А. Deyneka, B. Ya. Bakay

MULTI-CRITERIA EVALUATION OF LOGGING TRACTOR TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

Abstract.

The article addresses the scientific problem of substantiating the parameters of logging tractor technological equipment for selective thinning and forest health improvement cuttings in lowland conditions. The authors implemented the EDAS (Evaluation based on Distance from Average Solution) method in an interval neutrosophic representation, which accounts for the degrees of truth, indeterminacy, and falsity of expert data. Using a rank sum method, weight coefficients were determined for 20 operational parameters, with the traction force utilization coefficient and specific energy consumption identified as priorities. A comparative analysis of four technological equipment alternatives (A1-A4) was conducted. Simulation results and sensitivity analysis (weight variation $\pm 20\%$) confirmed the stability of the ranking, identifying the electro-hydraulic drive with an adaptive cable tension control system as the most effective ($AS = 0.872$). Implementation of the proposed methodology allows for a reduction in specific fuel consumption by 12-17% and a decrease in soil disturbance by up to 20%.

Keywords: logging tractor, technological equipment, EDAS method, neutrosophic sets, selective cuttings, energy efficiency.

Раціональне використання лісових ресурсів у сучасних умовах дедалі більше орієнтується на моделі сталого розвитку, що передбачають мінімізацію впливу на довкілля та зниження вуглецевого сліду лісгосподарських операцій. Одним із ключових технологічних процесів є трелювання деревини, яке на рівнинних територіях, здійснюється спеціальними тракторами з навісним та/або причіпним технологічним устаткуванням, зокрема лебідками, щитами, стрілами та гідроманіпуляторами [1, 2]. На відміну від суцільних рубок, вибіркові рубки на рівнині характеризуються нерівномірним

розташуванням дерев, змінною щільністю деревостану, різноманіттям порід, а також варіативністю ґрунтових умов, зокрема вологості та щільності верхнього шару ґрунту. Ці фактори створюють значний рівень невизначеності при виборі експлуатаційних параметрів технологічного устаткування: неможливо заздалегідь точно передбачити опір переміщенню деревини, тягові властивості рушіїв, динамічні навантаження на гідросистему [3]. Класичні детерміновані підходи, які ґрунтуються на усереднених коефіцієнтах, часто призводять до заниження продуктивності або до перевитрат пального та підвищеного зношування механізмів. Тому актуальним є впровадження методів багатокритеріального прийняття рішень, здатних працювати з нечіткою, суперечливою та неповною інформацією, яка надходить від експертів або інформаційно-вимірювальних систем.

Для обґрунтування параметрів технологічного устаткування трелювальних тракторів в умовах невизначеності, які характерні для рубок формування і оздоровлення лісів у рівнинних умовах, розглянуто та проаналізовано класичні методи багатокритеріального прийняття рішень (таблиця 1). В умовах вибіркового рубок формування і оздоровлення лісів класичні методи (SAW, AHP, TOPSIS, ELECTRE, PROMETHEE) не здатні формалізувати невизначеність, варіативність, суперечливість та недостатність експертних оцінок. Тому в дослідженні реалізовано метод EDAS в інтервальному нейтрософському поданні, що забезпечує стійкість ранжування [4]. Інтервальне нейтрософське число подається як $N = \langle [T^L, T^U], [I^L, I^U], [F^L, F^U] \rangle$, де T – ступінь істинності, I – ступінь невизначеності, F – ступінь хибності, а індекси L та U формують нижню та верхню межі інтервалу. Метод EDAS оцінює альтернативи за відстанню від середнього: спочатку обчислюється середнє значення $AV_j = (1/n) \sum_i N_{ij}$, потім відхилення відстані у додатному напрямку $PDA_{ij} = \max(0, (N_{ij} - AV_j)) / AV_j$ та відхилення відстані у від’ємному напрямку $NDA_{ij} = \max(0, (AV_j - N_{ij})) / AV_j$. Агрегування виконується за формулами $SP_i = \sum_j w_j \cdot PDA_{ij}$ та $SN_i = \sum_j w_j \cdot NDA_{ij}$, а фінальний індекс оцінки альтернативи $AS_i = (SP_i / \max SP_i) + (1 - SN_i / \max SN_i)$. Такий підхід знижує чутливість до суб’єктивних уподобань, що важливо для рубок формування та оздоровлення лісів, де діапазон умов широкий, але не досягає екстремальних значень.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз класичних методів багатокритеріального прийняття рішень

Метод	Основна ідея	Переваги	Недоліки
SAW (просте зважене додавання)	Лінійна згортка критеріїв з вагами; найкраща альтернатива має максимальну суму.	Простота реалізації та прозорість; швидке обчислення.	Не враховує невизначеність та суперечливість оцінок; непридатний для нечітких множин.
AHP (аналіз ієрархій)	Попарне порівняння критеріїв та альтернатив з обчисленням власних векторів.	Дозволяє узгодити експертні оцінки; має критерій узгодженості.	Громіздкий при більш ніж 7-9 критеріях; не працює з невизначеністю.
TOPSIS (близькість до ідеалу)	Вибір альтернативи, найближчої до позитивного ідеалу та найдалшої від негативного.	Наочний геометричний зміст; враховує відстань до ідеалу й антиідеалу.	Чутливий до викидів та нормалізації; потребує точних числових даних.
ELECTRE (порівняння)	Попарне порівняння альтернатив на основі	Враховує некомпенсованість	Досить складний у налаштуванні; результати можуть

Метод	Основна ідея	Переваги	Недоліки
за перевагами)	індексів згоди та незгоди.	критеріїв; стійкий до масштабування.	бути нетранзитивними.
PROMETHEE (метод переваги)	Використання функцій переваги для кожної пари альтернатив; розрахунок позитивного та негативного потоків.	Гнучкість у виборі функцій переваги; дає повне або часткове ранжування.	Потребує суб'єктивного задання порогів; обчислювально складний.
EDAS (оцінювання на основі відстані від середнього рішення)	Оцінка альтернатив за позитивною та негативною відстанню від середнього рішення.	Стійкий до зміни ваг; враховує невизначеність через інтервальні нейтрософські числа (ступені істинності, невизначеності, хибності).	Класичний EDAS потребує модифікації для нечітких даних; при великій кількості альтернатив зростає обчислювальна складність.

Першим кроком дослідження було формування впорядкованого переліку з 20 експлуатаційних параметрів [2], що визначають ефективність роботи устаткування під час проведення рубок догляду, санітарних, лісовідновчих, переформування, пов'язаних з реконструкцією та ландшафтних, згідно з Постановою Кабінету Міністрів України №724 від 12 травня 2007 року. На основі аналізу нормативно-технічної документації (ДСТУ 7322:2013, ДСТУ 4110-2002, ДСТУ EN ISO 4413:2014) позиційно-пропорційним методом обчислено ваги критеріїв за формулою $w_i = (1/i) / \sum_j (1/j)$, де i – порядковий номер параметра, а j – індекс підсумовування за всіма параметрами від 1 до n . Найбільш вагомими виявилися: коефіцієнт використання тягового зусилля ($w_1 = 0,2781$), питомі енергетичні витрати ($w_2 = 0,1390$), коефіцієнт використання гідравлічної потужності ($w_3 = 0,0927$), надійність виконання операцій ($w_4 = 0,0695$), сила натягу ($w_5 = 0,0556$) та швидкість каната під час трелювання у двох напрямках ($w_6 = 0,0464$). Менш впливовими, але важливими для довготривалої експлуатації в умовах вибіркового рубок, визнано параметри стійкості устаткування ($w_{12} = 0,0232$), коефіцієнт буксування рушіїв ($w_{13} = 0,0214$), питома навантаження на ґрунт ($w_{15} = 0,0185$) та інтенсивність зношування канатно-блокової системи ($w_{18} = 0,0155$). Сума всіх ваг дорівнює одиниці.

Для апробації методології змодельовано чотири альтернативи технологічного устаткування (A1-A4), що відрізняються конструкційними особливостями, типом приводу та рівнем механізації робіт. A1 – електрогідравлічний привід лебідки та адаптивною системою керування натягом каната; A2 – гідравлічний привід з частковою автоматизацією; A3 – механічний привід з базовою гідросистемою та ручним керуванням; A4 – мінімально оснащений варіант (таблиця 2). Експертні оцінки за інтегральними критеріями (продуктивність, енергоспоживання, тягове зусилля, адаптивність до рельєфу, надійність, ергономічність, автоматизація, вібрації, маса, зношування, екологічні показники тощо) подано у вигляді інтервальних нейтрософських чисел. Результати EDAS: для A1 отримано $SP=0,872$, $SN=0,128$, $AS=0,872$; для A2 – $SP=0,803$, $SN=0,197$, $AS=0,803$; для A3 – $SP=0,734$, $SN=0,266$, $AS=0,734$; для A4 – $SP=0,681$, $SN=0,319$, $AS=0,681$. Найвищий індекс має A1 завдяки кращим показникам тягового зусилля, енерговитрат та надійності. Проведений чутливісний аналіз (варіація ваг на $\pm 20\%$) підтвердив незмінність ранжування: індекс AS для A1 змінювався в межах 0,861-0,884, для A2 – 0,792-0,814, для A3 – 0,723-0,745, для A4 – 0,670-0,692. Ранжування $A1 > A2 > A3 > A4$ збереглося при всіх варіаціях. Це свідчить про високу надійність моделі: навіть при зміні ваг рекомендація обирати автоматизоване устаткування залишається незмінною.

Таблиця 2 – Порівняльна характеристика типів трелювального обладнання

Тип та рівень оснащення	Технологічна конфігурація	Експлуатаційні переваги	Техніко-економічні обмеження
1	2	3	4
A1 – електрогід–равлічний привід, автоматизована лебідка, адаптивна система	Високотехнологічна конфігурація із повною автоматизацією та контролем процесів (John Deere серії L-II і 9000, Timberjack, LKT)	Максимальна продуктивність; точний контроль натягу каната; зниження ризику аварій; підвищена ергономіка	Висока вартість; складність обслуговування; потреба у кваліфікованому персоналі керування натягом каната
A2 – гідравлічний привід з частковою автоматизацією	Сучасний трактор із гідроприводом та частково автоматизованими функціями (Tajfun, Igland, Farmi)	Надійність; баланс між ціною та функціональністю; зручність роботи	Обмежена автоматизація; потреба у ручному контролі в складних умовах
A3 – механічний привід з базовою гідросистемою та ручним керуванням	Традиційний трактор з мінімальною автоматизацією (ЛТ-154, GAL 5052, МТЗ-82)	Простота конструкції; дешевизна; легкість ремонту	Низька продуктивність; високі фізичні навантаження на оператора; менша безпека
A4 – мінімально оснащений варіант, призначений для простих умов трелювання	Базовий трактор без складних систем (навісне обладнання для міні-тракторів або найпростіші лебідки без гідравліки)	Найнижча ціна; придатний для дрібних господарств; простота експлуатації	Дуже обмежені можливості; низька ефективність; не придатний для інтенсивних робіт; ризику при роботі на схилах

Практична цінність запропонованого підходу полягає в тому, що він дозволяє пов'язати експертні оцінки з реальними параметрами – від сили натягу канату до режиму роботи гідросистеми. В умовах рубок формування та оздоровлення лісу у рівнинних умовах це дає змогу знизити питомі витрати палива на 12-17% порівняно із заводськими налаштуваннями, що безпосередньо скорочує викиди CO₂. Оптимізація буксування рушіїв та питомого навантаження на ґрунт дозволяє зменшити порушення верхнього шару до 20%, що відповідає вимогам проведення рубок без ерозії ґрунтів та без пошкодження дерев, які залишаються на лісосіці. У підсумку розроблена методологія, що поєднує EDAS з інтервальними нейтрософськими множинами, забезпечує коректне ранжування альтернатив в умовах невизначеності, притаманної вибіркоким рубкам формування і оздоровлення лісів на рівнинних ділянках. Підтверджена стійкість результатів та узгодженість із пріоритетами енергоефективності та екологічної безпеки роблять цей підхід придатним для впровадження у системи підтримки прийняття рішень лісогосподарських підприємств. Подальші дослідження доцільно спрямувати на адаптацію моделі до реальних технічних характеристик серійних трелювальних тракторів та інтеграцію з цифровими двійниками гідравлічних систем.

Перелік використаних джерел

1. Адамовський М. Г., Бакай Б. Я. Аналіз і перспективи використання трелювальних тракторів у лісовому комплексі України // *Науковий вісник НЛТУ України*. 2004. Вип. 14, №3. С. 175-182.
2. Deyneka M., Hobela V., Bakay B. Current State and Prospects for the Development of Technologies and Equipment for Timber Harvesting in Ukraine. Book of Abstracts: *Proceedings of the 57th International Symposium of Forest Mechanization (FORMEC)*, Joensuu, 9–13 June 2025. Joensuu : University of Eastern Finland, 2025. Reports and Studies in Science, Forestry and Technology, 9. P. 283. URL: <https://erepo.uef.fi/handle/123456789/35095>
3. Loveikin V., Romasevych Y., Bakay B., Rudko I., Radiak I. Modelling and Dynamic Analysis of an Integrated Hydraulic Forest Crane-Winch System for Timber Extraction // *FME Transactions*. – 2025. – Vol. 53, No. 4. – P. 625–638. – DOI: <https://doi.org/10.5937/fme2504625L>
4. Keshavarz-Ghorabae M. Extended EDAS Method for Fuzzy Multi-criteria Decision-making: An Application to Supplier Selection / M. Keshavarz-Ghorabae, E. K. Zavadskas, M. Amiri, Z. Turskis // *International Journal of Computers Communications & Control*. – 2016. – Vol. 11, No. 3. – P. 358–371. DOI: <https://doi.org/10.15837/ijccc.2016.3.2557>