

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Навчально-науковий інститут інженерної механіки, автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій

Кафедра аграрної та лісової інженерії

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на тему

Обґрунтування виробничого процесу на основі впровадження сучасних технологій в умовах Бродівського дочірнього лісогосподарського підприємства ОКС ЛГП “Галсільліс”

Виконав: студент групи ЛІ-61м
спеціальності 205 Лісове господарство,
освітньо-професійної програми
Лісова інженерія
Бобик В. М.

Керівник: Бакай Б. Я.

Рецензент: Удовицький О. М.
(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Навчально-науковий інститут інженерної механіки, автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Кафедра аграрної та лісової інженерії

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

Спеціальність 205 Лісове господарство

Освітньо-професійна програма Лісова інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. завідувача кафедри АЛІ



доц. Бакай Б. Я.

" 07 " жовтня 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Бобику Василю Маріановичу

1. Тема роботи Обґрунтування виробничого процесу на основі впровадження сучасних технологій в умовах Бродівського дочірнього лісогосподарського підприємства ОКС ЛГП "Галсільліс",

керівник роботи Бакай Борис Ярославович, канд. техн. наук,
затверджені наказом університету від " 29 " липня 2025 року № С-461

2. Термін подання студентом роботи 16 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи базове підприємство – Бродівського дочірнього лісогосподарського підприємства ОКС ЛГП "Галсільліс"; об'єкт дослідження – трелювання деревини та параметри функціонування трелювальних машин; запропонувати та обґрунтувати виробничого процесу на основі впровадження сучасних технологій; врахувати розосередженість лісосік.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Стан проблеми щодо використання трелювального устаткування в умовах розосереджених лісосік

2. Обґрунтування та розроблення удосконаленого виробничого процесу на основі впровадження перспективних технологій

3. Виробничий процес на основі впровадження сучасних технологій лісосічних робіт та устаткування

4. Висновки







5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Схему оптимізованого технологічного процесу заготівлі деревини.

2. Графічне представлення продуктивності та собівартості роботи машин.

3. Зв'язок охорони праці, техніки безпеки, охорони лісових екосистем та безпеки у надзвичайних ситуаціях.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Бакай Б. Я., в. о. зав. кафедри	 02.10.2025	 20.10.2025
2	Бакай Б. Я., в. о. зав. кафедри	 21.10.2025	 17.11.2025
3	Бакай Б. Я., в. о. зав. кафедри	 18.11.2025	 18.12.2025

7. Дата видачі завдання 02.10.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Ч. ч.	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Стан проблеми щодо використання трелювального устаткування в умовах розосереджених лісосік	02.10.2025-20.10.2025 р.	
2	Обґрунтування та розроблення удосконаленого виробничого процесу на основі впровадження перспективних технологій	21.10.2025-17.11.2025 р.	
3	Виробничий процес на основі впровадження сучасних технологій лісосічних робіт та устаткування	18.11.2025-08.12.2025 р.	
4	Формування висновків та оформлення кваліфікаційної роботи	09.12.2025-15.12.2025 р.	

Студент 

(підпис)

Бобик В. М.

Керівник роботи 

(підпис)

Бакай Б. Я.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра: 79 с., 3 ч., 10 11 рис., 3 дод., 17 джерел.

Тема: Обґрунтування виробничого процесу на основі впровадження сучасних технологій в умовах Бродівського дочірнього лісгосподарського підприємства ОКС ЛГП “Галсільліс”.

ТЕХНОЛОГІЯ ЛІСОСІЧНИХ РОБІТ, ВИРОБНИЧИЙ ПРОЦЕС, ТРЕЛЮВАЛЬНІ МАШИНИ; НАБЛИЖЕНЕ ДО ПРИРОДИ ЛІСІВНИЦТВО, РЕСУРСОЕФЕКТИВНІСТЬ.

Об’єкт дослідження – трелювання деревини та параметри функціонування трелювальних машин.

Мета роботи – науково обґрунтувати та оптимізувати виробничий процес трелювання деревини в умовах розосереджених лісосік шляхом впровадження сучасних технологій, що забезпечують ефективність, ресурсозбереження та екологічну збалансованість.

Методи дослідження – застосовано методи аналізу, порівняння та моделювання; експериментальні дослідження включали спостереження й натурні вимірювання у виробничих умовах підприємства. Зібрані дані оброблялися із використанням сучасного програмного забезпечення для визначення оптимальних параметрів роботи трелювальних машин.

У роботі досліджено організацію виробничого процесу лісозаготівельних робіт у розосереджених лісосіках, з акцентом на ефективність використання трелювального устаткування та впровадження сучасних технологій.

Дослідження проведено на прикладі Бродівського ДЛГП “Галсільліс”, із застосуванням аналізу літературних джерел, моделювання параметрів трелювальної мережі та експериментальних вимірювань у виробничих умовах.

Отримані результати дозволили сформулювати рекомендації щодо оптимізації процесів трелювання, підвищення рівня механізації та зменшення техногенного навантаження на ґрунтовий покрив, що сприяє сталому розвитку лісової галузі.

ABSTRACT

Master's degree graduation thesis: 79 p., 3 ch., 10 ill., 3 add., 17 literature sources.

Thesis topic: Justification of the production process based on the introduction of modern technologies in the conditions of the subsidiary Brody forestry enterprise of the OKS LGP "Galsillis".

TECHNOLOGY OF FORESTRY WORKS, PRODUCTION PROCESS, STREAMING MACHINES; NATURAL FORESTRY, RESOURCE EFFICIENCY.

Study subject – logging and parameters of logging machines.

Research objective – to scientifically substantiate and optimize the production process of logging in conditions of dispersed logging by implementing modern technologies that ensure efficiency, resource conservation and ecological balance.

Research methods – methods of analysis, comparison and modeling were applied; experimental studies included observations and field measurements in the production conditions of the enterprise. The collected data were processed using modern software to determine the optimal parameters of logging machines.

The work investigated the organization of the production process of logging in dispersed logging, with an emphasis on the efficiency of the use of logging equipment and the implementation of modern technologies.

The study was conducted on the example of the Brody forestry enterprise of the OKS LGP "Galsillis", using the analysis of literary sources, modeling of the skidding network parameters and experimental measurements in production conditions.

The results obtained allowed us to formulate recommendations for optimizing skidding processes, increasing the level of mechanization and reducing the technogenic load on the soil cover, which contributes to the sustainable development of the forest industry.

ЗМІСТ

ВСТУП		8
1 СТАН ПРОБЛЕМИ ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ ТРЕЛЮВАЛЬНОГО УСТАТКОВАННЯ В УМОВАХ РОЗОСЕРЕДЖЕНИХ ЛІСОСІК		10
1.1	Теоретичні засади організації виробничих процесів у лісовому господарстві	10
1.2	Сучасні тенденції впровадження технологій у лісогосподарських підприємствах України та ЄС	12
1.3	Особливості організації виробничих процесів	14
1.4	Нормативно-правове забезпечення виконання лісозаготівельних робіт та лісогосподарських заходів	17
1.5	Огляд наукових досліджень щодо модернізації виробничих процесів та цифровізації лісогосподарського виробництва	19
1.6	Критичний аналіз виробничої діяльності Бродівського ДЛГП	22
2 ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБЛЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО ВИРОБНИЧОГО ПРОЦЕСУ НА ОСНОВІ ВПРОВАДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ		26
2.1	Методичні засади формування оптимізованого виробничого процесу	26
2.2	Обґрунтування доцільності впровадження сучасних технологічних рішень для умов підприємства	28
2.3	Розробка оптимальної організації трелювання та вибір техніки	30
2.4	Економічне обґрунтування оптимізованого виробничого процесу	33
2.5	Економічний ефект від удосконалення виробничого процесу та запровадження перспективної технології	35

3 ВИРОБНИЧИЙ ПРОЦЕС НА ОСНОВІ ВПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЛІСОСІЧНИХ РОБІТ ТА УСТАТКОВАННЯ	39
3.1 Обґрунтування технологічної схеми лісозаготівлі із застосуванням багатоопераційних машин на РФОЛ	39
3.1.1 Аналіз природно-виробничих умов лісосіки та вибір технології заготівлі	40
3.1.2 Функціональні особливості та технічні параметри харвестера	42
3.2 Оптимізація трелювальних операцій із застосуванням форвардерів на РГК	45
3.2.1 Розрахунок параметрів трелювальної мережі та волоків	47
3.2.2 Вибір техніки та оцінка екологічного впливу	50
3.3 Впровадження інтелектуальної системи керування Smart Crane	54
3.4 Використання грейферів для оптимізації виробничого процесу на основі впровадження сучасних технологій	56
3.5 Виробнича організація та управління технологічним циклом	58
3.6 Особливості розроблення технологічних карт на основі впровадження сучасних технологій	60
3.7 Аналітичне порівняння варіантів технологій	61
3.8 Заходи з охорони праці, навколишнього середовища та безпека в надзвичайних ситуаціях	66
ВИСНОВКИ	72
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	74
ДОДАТКИ	76

ВСТУП

Лісове господарство є стратегічно важливою галуззю економіки України, що відіграє ключову роль у забезпеченні раціонального використання природних ресурсів, підтриманні регіональної екологічної рівноваги та формуванні стійких умов для сталого розвитку. Зростаючі вимоги до екологічної безпеки виробництва, які диктуються як внутрішнім законодавством, так і курсом на європейську інтеграцію, разом із необхідністю підвищення економічної ефективності лісозаготівельних робіт, вимагають невідкладного впровадження сучасних технологій і кардинального перегляду підходів до використання обладнання [1, 2]. Особливої гостроти набуває проблема використання трелювального устаткування для роботи в умовах розосереджених лісосік – специфічного організаційного формату, що виник внаслідок екологічних обмежень на площу суцільних рубок.

На сьогоднішній день розосередженість лісосік є одним із найбільш значущих факторів, що ускладнюють проведення лісозаготівельних робіт. Ця складність обумовлена комплексом взаємопов'язаних чинників, включаючи суттєве збільшення загальної протяжності трелювальних шляхів, необхідність створення та підтримки додаткової інфраструктури, а також неминуче підвищення логістичних витрат на транспортування деревини. Крім того, розташування лісосік у складних природно-кліматичних умовах, на ділянках із значними ухилами чи перезволоженими ґрунтами, призводить до зростання експлуатаційного навантаження на трелювальне устаткування, прискорення його зношування та підвищення ризику виникнення аварійних ситуацій.

Актуальність даної роботи полягає у необхідності наукового обґрунтування та розробки оптимальних технологічних рішень для підвищення ефективності трелювального процесу, що є надзвичайно важливим у контексті забезпечення раціонального використання лісових ресурсів, збереження біорізноманіття та виконання жорстких вимог екологічного законодавства.

Мета кваліфікаційної роботи фокусується на впровадженні передових технологій, які відповідають вимогам сучасного лісового господарства, на прикладі Бродівського дочірнього лісогосподарського підприємства ОКС ЛГП “Галсільліс” (надалі Бродівське ДЛП).

Змістова частина дослідження полягає у науковому обґрунтуванні параметрів трелювального устаткування, адаптованого до роботи в умовах розосереджених лісосік, і розробленні на його основі ефективного та екологічно збалансованого виробничого процесу для Бродівського ДЛП.

Виконання окресленої мети та завдань сприятиме вдосконаленню організації лісозаготівельних процесів, підвищенню рівня їх технічної та технологічної оснащеності, а також приведенню виробничих практик у відповідність до актуальних екологічних і технічних вимог лісового господарства. Отримані результати дослідження створять передумови для раціонального використання лісового фонду України та формування засад сталого розвитку вітчизняної лісової галузі.

1 СТАН ПРОБЛЕМИ ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ ТРЕЛЮВАЛЬНОГО УСТАТКОВАННЯ В УМОВАХ РОЗОСЕРЕДЖЕНИХ ЛІСОСІК

1.1 Теоретичні засади організації виробничих процесів у лісовому господарстві

Організація виробничих процесів у лісовому господарстві ґрунтується на системному підході до управління сукупністю технологічних операцій, які забезпечують раціональне використання лісових ресурсів, підтримання екологічної рівноваги та відтворення лісових екосистем [1]. Теоретичні основи таких процесів формуються на перетині лісівничої науки, технічної механіки, інженерної екології та науки про організацію виробництва, що надає лісогосподарській діяльності комплексного характеру [2]. Лісове господарство функціонує як біотехнічна система, у якій природні процеси тісно взаємодіють із техногенними впливами, що зумовлює необхідність врахування властивостей лісових екосистем під час проектування та реалізації виробничих операцій.

Теоретичні засади організації виробничих процесів передбачають встановлення їх структурної цілісності та послідовності, що забезпечує узгодженість між окремими стадіями підготовки, виконання та завершення технологічних операцій [2, 3]. У межах лісогосподарського виробництва це охоплює планування і проведення лісогосподарських заходів, організацію лісозаготівельного циклу, технічне забезпечення виконання робіт, контроль ефективності використання ресурсів та дотримання екологічних обмежень [3-7]. Ключовою особливістю виробничих процесів у лісовому господарстві є їхня залежність від природно-кліматичних умов, типів лісорослинних умов, рельєфу, сезонності та біологічних характеристик деревостанів, що потребує адаптивного підходу та високої гнучкості організаційних рішень.

Виробничий процес у лісовому господарстві в Україні традиційно розглядається як сукупність взаємопов'язаних технологічних операцій, що

включають підготовку лісосічного фонду, виконання лісозаготівельних робіт, трелювання, транспортування та первинну обробку деревини, а також заходи з відновлення, догляду та охорони лісів. Його теоретичне обґрунтування ґрунтується на принципах раціонального природокористування, технологічної сумісності операцій, мінімізації впливів на довкілля та забезпечення безпеки виконання робіт. У сучасних умовах ці принципи доповнюються концепцією ресурсоефективності, яка передбачає зменшення енергетичних та матеріальних витрат, оптимізацію навантажень на машинно-тракторний парк і впровадження інноваційних рішень, що забезпечують стале функціонування підприємств [2].

Особливе значення у теоретичних засадах організації виробничих процесів у Бродівському ДЛГП має питання технічного забезпечення та технологічної сумісності машин і механізмів. Ефективність застосування лісозаготівельної техніки визначається її відповідністю природно-виробничим умовам, структурі деревостанів, способам рубок, характеристикам трелювальних трас та умовам транспортування. Теорія організації виробництва в лісовому господарстві підкреслює важливість раціонального добору машинно-тракторних агрегатів, гармонізації взаємодії між окремими елементами технологічної системи та врахування технічних і експлуатаційних параметрів обладнання.

Наукова спільнота приділяє значну увагу інтеграції цифрових технологій у структуру виробничого процесу. Використання геоінформаційних систем, цифрових моделей рельєфу, методів дистанційного зондування та систем супутникової навігації дозволяє удосконалювати планування лісогосподарських операцій, забезпечувати точність прив'язки технологічних ліній і мінімізувати непередбачені втрати ресурсів [9, 10]. У теоретичному контексті це формує підґрунтя для розвитку концепції “інтелектуального лісогосподарського виробництва”, у межах якого виробничі процеси інтегруються з інструментами моніторингу, аналітичними платформами та системами підтримки прийняття рішень.

Підсумовуючи, теоретичні засади організації виробничих процесів у лісовому господарстві поєднують природничо-наукові, технічні та управлінські

підходи, забезпечуючи цілісне розуміння закономірностей формування, реалізації та оптимізації технологічних операцій. Ці засади є фундаментом для розроблення сучасних технологічних рішень, здатних забезпечити ефективне, екологічно збалансоване та економічно обґрунтоване ведення лісового господарства. Глибоке врахування цих принципів у подальших дослідженнях дає змогу формувати виробничі процеси, адаптовані до конкретних умов функціонування Бродівського ДЛГП, що є необхідною передумовою для модернізації лісогосподарського виробництва.

1.2 Сучасні тенденції впровадження технологій у лісогосподарських підприємствах України та ЄС

Сучасний етап розвитку лісогосподарської галузі характеризується інтенсивним упровадженням інноваційних технологій, спрямованих на підвищення ефективності виробничих процесів, зменшення антропогенних впливів на лісові екосистеми та забезпечення ресурсоефективності [9-12]. У країнах Європейського Союзу такі технологічні зміни відбуваються системно, оскільки вони інтегруються у формат довгострокових стратегій сталого управління лісами, зокрема EU Forest Strategy 2030. Натомість в Україні процес технологічної модернізації має нерівномірний характер, однак поступово прискорюється під впливом ринкових вимог, реформування лісового господарства та зростання ролі екологічних стандартів.

У країнах ЄС широке застосування мають геоінформаційні системи, які формують просторові моделі лісового фонду з точністю до 0,5-1,0 метра, що забезпечує високу деталізацію планування лісосічних робіт. За даними Шведського лісового агентства, понад 85 % планових лісогосподарських операцій у Швеції здійснюються на основі цифрових карт, створених за результатами повітряного лазерного сканування. У Фінляндії щороку оновлюється майже 1,6 млн гектарів цифрових лісових інвентаризацій, що забезпечує оперативність прийняття управлінських рішень та точність

призначення рубок [12-15].

В Україні масштаби цифровізації суттєво нижчі: станом на 2023 рік, за оцінками Державного агентства лісових ресурсів, повна цифрова інвентаризація виконана менш ніж на третині площі державного лісового фонду. Водночас низка підприємств, зокрема у Західному регіоні, активно впроваджує технології мобільного збору даних, GPS-прив'язки трелювальних волоків та цифрових карт лісосік. Практика показує, що використання мобільних навігаційних платформ знижує похибку розміщення волоків на 20–25 %, що, у свою чергу, зменшує площу техногенного порушення ґрунтового покриву щонайменше на 8–12 %.

Другим важливим технологічним трендом є автоматизація й роботизація лісозаготівельних операцій. У країнах Північної Європи частка машинного заготівельного циклу із застосуванням багатоопераційних машин (харвестерно-форвардерної технології) сягає 95–98 %. Такі машини забезпечують високу продуктивність: сучасні харвестери здатні заготовляти 20–25 м³ деревини за годину роботи, водночас забезпечуючи точність розкрязування відповідно до стандартів деревини. Для порівняння, продуктивність бригади, що працює бензиномоторними пилами, зазвичай не перевищує 6–8 м³/год. Причинно-наслідковий зв'язок є очевидним: вища продуктивність машинного циклу сприяє скороченню тривалості лісозаготівельного процесу на 40–60 %, а отже зменшує кількість проходів техніки та інтенсивність порушення ґрунту на трелювальних волоках [12, 14].

В Україні рівень механізації значно нижчий: за даними галузевих оглядів 2022–2023 рр., частка використання харвестерів і форвардерів у заготівлі деревини становить близько 15-18 %. Це створює нерівномірне навантаження на підприємства, збільшує частку ручних операцій і підвищує ризики виробничого травматизму. Окремі підприємства Львівської та Івано-Франківської областей, які впровадили сучасні машини шведського або фінського виробництва, продемонстрували зростання продуктивності заготівлі на 30–45 % і скорочення експлуатаційних витрат на 12-18 %. Таким чином, технологічне оновлення парку машин створює пряму причинно-наслідкову залежність між технічним рівнем

підприємства та стійкістю його виробничої діяльності.

Третя тенденція, це упровадження технологій екологічного спрямування. Європейські підприємства лісового господарства дедалі частіше застосовують легкі малогабаритні машини, що зменшують питомий тиск на ґрунт до 30-45 кПа, тоді як традиційні трелювальні трактори можуть створювати навантаження 80-120 кПа. Зменшення тиску приводить до зниження глибини колісних вибоїн у середньому на 4-7 см, що суттєво знижує інтенсивність ерозійних процесів на волоках. У гірських умовах Карпат така технологічна переорієнтація могла б скоротити площу ерозійно-небезпечних ділянок на 15-20 %.

Важливим напрямом модернізації є також використання систем моніторингу стану техніки та робіт. У провідних підприємствах ЄС застосування телематики дозволило зменшити непродуктивні простої машин на 12-20 % і знизити витрати пального до 10 %. Для українських підприємств упровадження таких систем особливо актуальне з огляду на високий рівень зношеності машинного парку, що у середньому становить понад 65 %.

Таким чином, аналіз сучасних тенденцій демонструє чіткі причинно-наслідкові зв'язки між впровадженням новітніх технологій та рівнем ефективності, екологічності й безпечності виробничих процесів. Порівняння досвіду України та ЄС засвідчує наявність значного потенціалу для технологічного розвитку українських лісогосподарських підприємств, особливо шляхом інтеграції цифрових інструментів, автоматизованої техніки та екологічно орієнтованих технологій заготівлі деревини. Ці тенденції є безпосереднім підґрунтям для формування сучасного виробничого процесу в умовах Бродівського ДЛГП, що буде детально висвітлено у наступних розділах кваліфікаційної роботи.

1.3 Особливості організації виробничих процесів

Організація виробничих процесів у рівнинних лісових екосистемах ґрунтується на специфічних природно-географічних характеристиках, які

визначають структуру деревостанів, динаміку ґрунтових процесів, інтенсивність техногенного навантаження та можливості впровадження сучасних технологій. Рівнинні ліси України, що охоплюють значну частку Полісся та Лісостепу, формуються за умов порівняно стабільного рельєфу, невеликої амплітуди висот і однорідного ґрунтово-лісового середовища, що створює передумови для точного планування виробничих операцій і раціонального розміщення технологічних ліній [1, 2, 9-14].

Відсутність різких перепадів висот у рівнинних екосистемах забезпечує більш прогнозовану взаємодію машин із ґрунтовою поверхнею та сприяє зменшенню ризику утворення локальних ерозійних осередків. Проте рівнинні землі мають і свою чутливість: через переважання супіщаних, дерново-підзолистих та сірих лісових ґрунтів з невисокою природною стійкістю до ущільнення виробничий тиск техніки, навіть середньої маси, може спричинювати погіршення водно-повітряного режиму. Дослідження Українського науково-дослідного інституту лісового господарства свідчать, що при одноразовому проході техніки з питомим тиском 70-90 кПа щільність верхнього шару ґрунту може зростати на 8-12 %, а водопроникність зменшується майже вдвічі. Ці показники прямо впливають на здатність екосистеми до природного відновлення, оскільки ущільнений ґрунт знижує життєздатність підросту та уповільнює проростання лісових порід [10-12].

Рівнинні екосистеми характеризуються відносно простою структурою волоків і технологічних коридорів, що дозволяє оптимізувати схеми трелювання та транспортування деревини. За оцінками виробничих підприємств Полісся, використання прямолінійних волоків довжиною 250-350 метрів знижує витрати часу на маневрування техніки на 12-18 %, що безпосередньо скорочує витрати пального та зменшує площу пошкодження ґрунту. У гірських умовах подібна оптимізація є неможливою через складний рельєф, що підтверджує причинно-наслідковий зв'язок між просторовою організацією території та ефективністю виробничих процесів.

Планування лісосічних робіт у рівнинних умовах спирається на

картографічні моделі, які забезпечують високу точність визначення меж ділянок, орієнтацію волоків та вибір технологічної схеми заготівлі. За даними лісовпорядних підприємств, впровадження цифрових карт масштабу 1:10000 дозволяє зменшити похибку прив'язки лісосіки до 2-4 метрів, що підвищує точність проектування виробничого процесу, сприяє рівномірному розподілу техніки та знижує ризик ненавмисного виходу за межі планових ділянок. У рівнинних екосистемах ця точність є особливо важливою, оскільки лісові квартали часто межують з сільськогосподарськими або рекреаційними ділянками, що потребує чіткої просторової організації робіт [2, 9].

Сучасні технології машинної заготівлі деревини демонструють особливо високу ефективність саме в рівнинних умовах. Харвестерно-форвардерний цикл забезпечує мінімальний негативний вплив на ґрунт за рахунок стабільної тяги, відсутності потреби у трелюванні волоком та точного контролю за траєкторією руху машини. У польових випробуваннях, проведених на підприємствах північного Лісостепу, було встановлено, що застосування форвардерів з питомим тиском на ґрунт 35-45 кПа дозволяє зменшити площу порушення ґрунтового покриву на 20-25 % порівняно з традиційними трелювальними тракторами серії ТТ-4, питомий тиск яких у дві-три рази вищий. Це підтверджує прямий причинно-наслідковий зв'язок між технічними параметрами машин та екологічною стабільністю виробничих процесів.

Особливістю рівнинних екосистем є відсутність значних обмежень, пов'язаних із нахилом поверхні, що дає змогу впроваджувати точні схеми руху техніки, використовувати навігаційні системи та забезпечувати геометричну правильність волоків. У результаті зменшується кількість непередбачених маневрів техніки, що на практиці скорочує витрати пального на 6-10 % і знижує швидкість деградації ґрунтової поверхні [2]. Це демонструє, що рівнинні екосистеми створюють передумови для широкого впровадження сучасних технологій, включно з телеметричними системами контролю, цифровими моделями рельєфу та автоматизованими методами проектування лісосічних робіт.

Підсумовуючи, виробничі процеси в рівнинних лісових екосистемах мають високу адаптивність до впровадження сучасних технологій завдяки простоті рельєфу, можливості оптимізації траєкторій руху техніки та використанню точних картографічних моделей. Водночас чутливість ґрунтів до ущільнення зумовлює необхідність впровадження машин із низьким питомим тиском, сучасних систем моніторингу та технологій з мінімальним екологічним впливом. Це формує наукове підґрунтя для подальшого аналізу виробничого процесу Бродівського ДЛГП, діяльність якого здійснюється переважно в умовах рівнинних лісових екосистем.

1.4 Нормативно-правове забезпечення виконання лісозаготівельних робіт та лісогосподарських заходів

Нормативно-правове забезпечення організації та виконання лісогосподарських заходів у рівнинних лісових екосистемах України базується на системі законодавчих і підзаконних актів, які визначають правовий режим лісів, порядок їх використання, охорони, відтворення та ведення лісового господарства [3]. Ці документи формують єдину методологічну основу для планування, організації та контролю виробничих процесів на рівні підприємств, забезпечуючи відповідність технологічних операцій екологічним, ресурсним та безпековим вимогам.

Базовим законодавчим актом у сфері лісових відносин є Лісовий кодекс України, який визначає категорії лісів, порядок організації лісового господарства й принципи сталого управління лісовими ресурсами. У ньому закріплено, що ведення лісового господарства має забезпечувати безперервне, науково обґрунтоване та екологічно безпечне використання лісів. Кодекс також регламентує структуру лісовпорядкування, вимоги до планування заходів із догляду, відновлення та охорони лісів, включно з обов'язковим проведенням інвентаризацій та обліку лісових ресурсів [3].

Важливу роль відіграють акти Кабінету Міністрів України, які деталізують

норми функціонування лісогосподарських підприємств. Зокрема, у переліку лісогосподарських заходів, правилах їх підготовки та погодження визначено порядок проведення лісогосподарських робіт у різних категоріях лісів, включно з рівнинними екосистемами. Регламентовано технологічні підходи до заготівлі деревини, догляду за лісом, відтворення лісів та охорони їх від шкідників і хвороб. Особлива увага приділена питанням мінімізації впливу на ґрунтовий покрив, оскільки саме деградація верхнього гумусового горизонту на рівнині є ключовим чинником зниження продуктивності насаджень і зміни водного режиму ділянок [4-6].

Виконання виробничих процесів на лісогосподарських підприємствах регламентують також галузеві стандарти та правила. Вони містять деталізовані вимоги до технологій трелювання, лісовідновлення, проведення рубок догляду, санітарних заходів, а також до організації робіт у лісових масивах з різною категорією доступності. У межах рівнинних лісів особливо регламентується питання механізованої заготівлі з обмеженням ширини трелювальних волоків, допустимої інтенсивності руху машин і вимог до рекультивації порушених ділянок.

Нормативно-правова база у сфері охорони навколишнього середовища, зокрема закони, що регламентують охорону атмосферного повітря, водних ресурсів та земель, формують обов'язкові екологічні критерії для планування лісогосподарських заходів. У підзаконних актах встановлено обов'язковість проведення оцінки впливу на довкілля для окремих видів робіт, що вимагає від підприємств підтвердження дотримання природоохоронних вимог при організації виробничих процесів [4-6].

Система пожежної безпеки в лісах регулюється спеціальними правилами та інструкціями, які передбачають вимоги до проведення робіт у пожежонебезпечний період, обмеження на використання машин і механізмів, а також обов'язковість створення протипожежної інфраструктури.

На рівні технічного регулювання значну роль відіграють стандарти безпеки праці під час виконання лісозаготівельних та лісогосподарських робіт.

У стандартах узагальнено вимоги до експлуатаційних режимів машин, допустимих навантажень, організації робочих місць, маршрутів руху техніки, ширини й глибини технологічних коридорів тощо. За даними технічних норм, наприклад, ширина волоків у рівнинних умовах має не перевищувати 3,5 м, а допустимий тиск на ґрунт колісної техніки в умовах підвищеної зволоженості – 60-80 кПа, що на пряму пов'язано з ризиком деформації верхнього шару ґрунту.

Нормативна база також визначає вимоги до лісовпорядної документації, яка є основою для планування виробничих процесів [3, 4]. Структура матеріалів лісовпорядкування включає таксаційні описи, тематичні карти, матеріали обстежень, розрахунки обсягів лісокористування, плани лісовідновлення та охорони лісів. Усі заплановані заходи мають відповідати установленим нормам, що забезпечує контрольованість і передбачуваність завантаження виробничих потужностей.

Таким чином, нормативно-правова база забезпечує інтегрований і науково обґрунтований підхід до організації виробничих процесів у рівнинних лісових екосистемах. Через систему регламентів, стандартів і правил встановлюються причинно-наслідкові зв'язки між технологічними рішеннями та екологічними вимогами, що забезпечує збереження ґрунтового покриву, біорізноманіття й стійкості лісових масивів, а також гарантує ефективність і безпеку лісогосподарського виробництва.

1.5 Огляд наукових досліджень щодо модернізації виробничих процесів та цифровізації лісогосподарського виробництва

Аналіз сучасних наукових досліджень у сфері лісового господарства свідчить, що модернізація виробничих процесів і цифровізація лісогосподарського виробництва є ключовими напрямками підвищення ефективності та стійкості підприємств. Провідні вітчизняні та зарубіжні роботи демонструють, що інтеграція цифрових технологій у виробничі цикли дозволяє оптимізувати використання машин і механізмів, скоротити час виконання

технологічних операцій та зменшити негативний вплив на екосистеми [9-11].

Одним із важливих напрямів модернізації є автоматизація лісозаготівельних процесів. За даними досліджень шведських науковців, застосування харвестерно-форвардерної технології дозволяє підвищити продуктивність заготівлі деревини в середньому на 250-300 % порівняно з традиційними методами з використанням бензомоторних пил і ручної трелювання [10-13, 15]. Причинно-наслідковий зв'язок полягає у тому, що скорочення часу роботи на одиницю об'єму деревини зменшує кількість проходів техніки по лісовій ділянці, що безпосередньо знижує ущільнення ґрунту та втрати продуктивності верхнього шару. Аналогічні результати підтверджують дослідження фінських та німецьких учених, які встановили, що сучасні машини з телематикою дозволяють контролювати маршрути руху та оптимізувати завантаження техніки, скорочуючи енергетичні витрати на 15-20 % та збільшуючи ресурсний потенціал підприємства.

Вітчизняні наукові роботи, зокрема дослідження НЛТУ України та УкрНДЦЛГА (2020-2023 рр.), підтверджують ефективність застосування цифрових моделей для планування виробничих процесів у рівнинних та горбистих лісових екосистемах [1, 2]. Використання ГІС дозволяє формувати точні карти лісосік і волоків, визначати оптимальні маршрути руху техніки, а також розраховувати допустимі навантаження на ґрунт у різних умовах. Практичні випробування показали, що інтеграція ГІС у планування робіт скорочує похибку розміщення технологічних ліній до 2-3 метрів, що зменшує площу порушеного ґрунту на 10-15 %.

Сучасні дослідження також зосереджуються на впровадженні сенсорних і телематичних систем для контролю стану машин, моніторингу продуктивності та оптимізації процесів обробки деревини. Наприклад, у роботах українських вчених доведено, що застосування телеметрії дозволяє зменшити непродуктивні простої машин на 12-18 %, а витрати пального – на 810 %. Це підкреслює прямий причинно-наслідковий зв'язок між цифровізацією виробничих процесів і економічною ефективністю підприємства.

Особлива увага в наукових джерелах приділяється інтеграції екологічних аспектів у модернізацію виробництва. Дослідження Карпатського національного університету та Національного університету біоресурсів і природокористування (2021-2024 рр.) показують, що застосування сучасних легких машин з низьким питомим тиском на ґрунт у рівнинних екосистемах знижує інтенсивність ерозійних процесів на 15-20 %, зберігає верхній шар ґрунту та сприяє швидшому відновленню лісових порід.

Окремий напрям наукових робіт стосується цифровізації лісовпорядкування та інвентаризації лісів. Використання методів дистанційного зондування, LiDAR-сканування та дронів дозволяє отримувати об'єктивні дані про обсяг деревини, структуру деревостанів та стан лісових масивів. Згідно з дослідженнями Європейського агентства лісів, застосування LiDAR у поєднанні з ГІС підвищує точність оцінки запасів деревини на 18-25 %, що створює можливість більш раціонального планування рубок і трелювання, а отже – зменшує виробничі втрати та негативний вплив на екосистеми.

Вітчизняні наукові роботи також показують, що цифровізація дозволяє впроваджувати інноваційні підходи до планування волоків, що, в свою чергу, скорочує тривалість виробничого циклу і підвищує продуктивність праці. Наприклад, дослідження підприємств Західної України демонструють, що застосування цифрових карт і GPS-навігації у плануванні волоків зменшило час виконання трелювання на 18-22 % та скоротило пробіг техніки по ділянці на 10-15 %, що підкреслює причинно-наслідковий зв'язок між технологічними інноваціями та ефективністю виробничих процесів.

Отже, аналіз наукових джерел засвідчує, що модернізація виробничих процесів і цифровізація лісогосподарського виробництва створюють синергетичний ефект, у якому підвищення продуктивності, економічна ефективність і екологічна безпека взаємопов'язані. Наукові результати підтверджують, що застосування інноваційних технологій у поєднанні з цифровими інструментами дає змогу підприємствам не лише оптимізувати ресурсне використання, але й забезпечувати стале функціонування лісових

екосистем, що є ключовою передумовою для розроблення ефективного виробничого процесу на прикладі Бродівського ДЛГП.

1.6 Критичний аналіз виробничої діяльності Бродівського ДЛГП

Бродівське ДЛГП є одним із провідних лісогосподарських суб'єктів Львівської області (рис. 1.1), що здійснює комплексне ведення лісового господарства на території, яка переважно належить до рівнинних лісових екосистем. Площа лісового фонду підприємства становить близько 12,5 тис. га, із яких 75 % займають насадження хвойних та змішаних порід, а решта – листяні. Лісові квартали характеризуються відносно рівним рельєфом та сприятливими умовами для застосування сучасних технологій заготівлі й трелювання деревини.



Рисунок 1.1 – Головна контора Бродівського ДЛГП

Виробничі потужності підприємства включають лісозаготівельну техніку, автотранспорт для внутрішнього перевезення деревини та устаткування для первинної обробки деревини (рис. 1.2). За даними обліку, стан парку машин характеризується високим зношенням: понад 65 % техніки відпрацювала свій нормативний ресурс, що обмежує продуктивність і підвищує експлуатаційні витрати. Це створює прямий причинно-наслідковий зв'язок: високий рівень зношеності машин призводить до збільшення простоїв, зростання витрат

пального на 15-20 % та збільшення часу виконання технологічних операцій на 10-12 %.



Рисунок 1.2 – Головна контора Бродівського ДЛГП

Технологічний процес заготівлі деревини на підприємстві складається з підготовчих робіт, проведення рубок, трелювання деревини та внутрішнього транспортування. Підготовчі роботи включають розмітку лісосік, прокладання трелювальних волоків і підготовку машинно-тракторного парку. Досвід експлуатації технічних засобів показує, що прокладання волоків здійснюється переважно з використанням бульдозерів або з частковим застосуванням навігаційних систем, що призводить до похибок розташування ліній трелювання до 5-7 метрів, а інколи – до 10 метрів на великих ділянках. Це зумовлює збільшення площі порушеного ґрунтового покриття та підвищує ризик ерозійних процесів, особливо після сильних опадів.

Рубки деревини здійснюються із застосуванням бензопил у поєднанні з трелювальними тракторами ЮМЗ-6 і МТЗ-80.2 (рис. 1.3). Продуктивність традиційної бригади становить 6-8 м³ деревини на годину, тоді як сучасний харвестер може обробляти 20-25 м³ на годину. У результаті частка ручної роботи і застарілої техніки істотно знижує ефективність виробничого циклу та збільшує навантаження на персонал. Причинно-наслідковий зв'язок очевидний: низька продуктивність заготівлі деревини збільшує тривалість робіт, а отже, і площу техногенного впливу на рівнинні лісові ділянки.



Рисунок 1.3 – Трелювання деревини на підприємстві

Трелювання деревини здійснюється тракторним методом із використанням однобарабаних лебідок або чокерів. Питомий тиск на ґрунт колісних тракторів становить 80-120 кПа, що при роботі на вологих ґрунтах призводить до ущільнення верхнього шару до 15 %, а водопроникність зменшується майже вдвічі. Наслідком є затримка природного відновлення підросту та погіршення водно-повітряного режиму ґрунтів. Лише застосування форвардерів із низьким питомим тиском на ґрунт (35-45 кПа) у перспективі дозволить зменшити площу пошкодження ґрунту на 20–25 %, що матиме прямий причинно-наслідковий зв'язок між технічними параметрами машин і станом екосистеми.

Економічний аналіз діяльності підприємства показує, що витрати пального та зношення техніки складають близько 40-45 % виробничих витрат на заготівлю деревини. Недосконала організація трелювання та низький коефіцієнт технічної готовності призводять до додаткових витрат часу і матеріальних ресурсів, що знижує рентабельність виробництва. Водночас застосування цифрових карт та GPS-навігації могло б скоротити непотрібні проходи техніки на 10-15 % і зменшити витрати пального на 8-10 %, як свідчать дослідження підприємств Західної України.

Продуктивність праці також знаходиться на нижчому рівні через обмежене

впровадження автоматизованих технологій: на сьогодні заготівля деревини не здійснюється з використанням харвестерно-форвардерної техніки. Це знижує швидкість виконання робіт і збільшує навантаження на персонал, підвищуючи ризик виробничого травматизму. Водночас, за оцінками фахівців, модернізація машинного парку і впровадження телеметричних систем могли б підвищити продуктивність на 30-45 % та знизити експлуатаційні витрати на 12-18 %.

Рівнинні лісові ділянки Бродівського ДЛГП характеризуються високою чутливістю до техногенного впливу. Інтенсивність руйнування ґрунтового покриву прямо залежить від маси техніки, частоти проходів і ширини волоків. Спостереження проведені у виробничих підрозділах підприємства показують, що при відсутності оптимізації схем трельовання площа пошкодженого верхнього шару ґрунту може досягати 12-15 % лісосіки, тоді як при використанні сучасних технологій площа пошкодженого верхнього шару ґрунту знижується до 5-7 %. Відповідно, швидкість відновлення підросту та інтенсивність ерозійних процесів безпосередньо залежать від організації виробничих операцій.

Таким чином, критичний аналіз діяльності Бродівського ДЛГП демонструє, що підприємство має значний потенціал для підвищення ефективності виробничих процесів через модернізацію технічного парку, цифровізацію планування робіт та застосування екологічно безпечних технологій. Встановлені причинно-наслідкові зв'язки між технічним оснащенням, організацією робіт та станом екосистем дозволяють аргументовано планувати впровадження сучасних технологій, що стане основою для оптимізації виробничого процесу в подальших розділах кваліфікаційної роботи.

2 ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБЛЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО ВИРОБНИЧОГО ПРОЦЕСУ НА ОСНОВІ ВПРОВАДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

2.1 Методичні засади формування оптимізованого виробничого процесу

Формування оптимізованого виробничого процесу на Бродівському ДЛГП базується на системному підході, який передбачає інтеграцію сучасних технологій заготівлі деревини, цифрових методів планування та екологічно безпечних виробничих практик. Методологія побудована на взаємозв'язку технологічних, економічних та екологічних критеріїв ефективності, що дозволяє встановлювати причинно-наслідкові залежності між вибором технології, експлуатаційними характеристиками машин та станом лісових екосистем.

Першим етапом формування оптимізованого процесу є аналіз існуючих технологічних схем і визначення критичних точок виробництва, що знижують ефективність. До таких точок відносяться: нерівномірне прокладання волоків, високий питомий тиск машин на ґрунт, низька продуктивність ручної заготівлі, недосконалість планування маршрутів транспортування деревини. Причинно-наслідковий зв'язок проявляється у тому, що кожен із цих факторів безпосередньо збільшує експлуатаційні витрати, погіршує стан ґрунтового покриву та зменшує швидкість відновлення лісу.

Оптимізація виробничого процесу здійснюється за допомогою модульного підходу, що включає три основні блоки:

1. Технологічний блок, який передбачає впровадження сучасних машинних комплексів (харвестерно-форвардерна технологія), автоматизацію трелювання та застосування GPS-навігації для визначення точних маршрутів. Тут встановлюється прямий причинно-наслідковий зв'язок: зменшення кількості проходів техніки на одиницю деревини знижує питомий тиск на ґрунт, скорочує площу порушеного покриву та підвищує продуктивність.

2. Екологічний блок, який включає контроль за станом ґрунту, моніторинг ерозійних процесів та оцінку впливу техніки на верхній гумусовий шар. Для оцінки ефективності застосовується коефіцієнт впливу техніки на ґрунт $K_{гр}$, який визначається як:

$$K_{гр} = \frac{P_{тех}}{S_{діл}} \cdot \frac{t_{прох}}{T_{роб}}, \quad (2.1)$$

де $P_{тех}$ – питома вага техніки, кПа;

$S_{діл}$ – площа оброблюваної ділянки, м²;

$t_{прох}$ – тривалість одного проходу, год.;

$T_{роб}$ – загальна тривалість робіт на ділянці, год.

Зниження $K_{гр}$ до мінімально допустимого значення забезпечує збереження екологічної стабільності рівнинних лісових масивів.

3. Економічний блок, який включає розрахунок витрат пального, зношення техніки, трудових ресурсів і продуктивності. Ефективність виробничого процесу оцінюється за критерієм витрат на одиницю деревини за такою формулою

$$E = \frac{C_{пальн} + C_{знош} + C_{прац}}{V_{дер}}, \quad (2.2)$$

де $C_{пальн}$ – витрати пального, грн;

$C_{знош}$ – амортизаційні та ремонтні витрати на техніку, грн;

$C_{прац}$ – витрати на оплату праці, грн;

$V_{дер}$ – обсяг заготівлі деревини, м³.

Мета оптимізації полягає у мінімізації E без порушення екологічних і технологічних критеріїв.

Для практичного впровадження методики використовується комбінований підхід: на основі цифрових карт та ГІС-моделей лісосік розробляються оптимальні маршрути волоків, розраховується щільність проходів техніки, встановлюються типи машин і їхня послідовність роботи. Графічно це можна представити у вигляді схеми технологічного циклу з позначенням критичних

точок, де застосовується контроль та коригування параметрів (рис. 2.1).

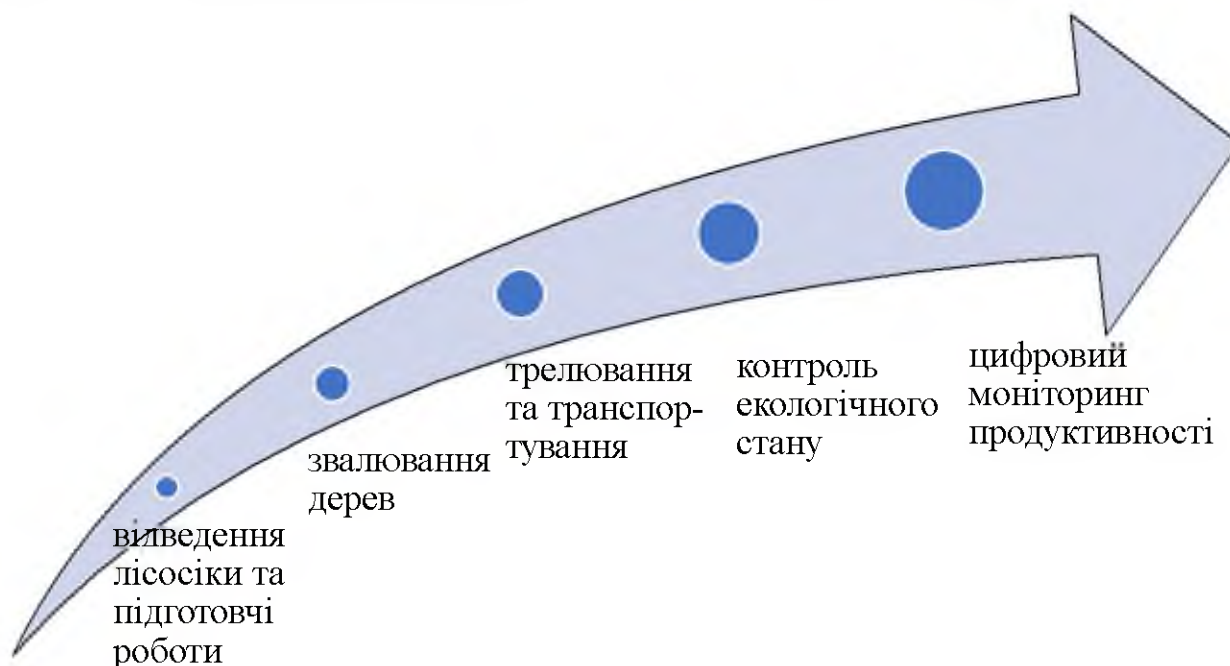


Рисунок 2.1 – Схема оптимізованого технологічного процесу заготівлі деревини (включає блоки: розмітка та підготовка ділянки – рубка деревини – трелювання – внутрішнє транспортування – контроль екологічного стану – цифровий моніторинг продуктивності)

Таким чином, методичні засади формування оптимізованого виробничого процесу передбачають комплексну інтеграцію технологічних, екологічних і економічних параметрів, встановлення причинно-наслідкових зав'язків між ними та використання сучасних цифрових інструментів для підвищення ефективності, зменшення екологічного впливу та економії ресурсів. Ця методика стане основою для конкретних пропозицій щодо модернізації виробничих операцій Бродівського ДЛПТ у наступних підрозділах.

2.2 Обґрунтування доцільності впровадження сучасних технологічних рішень для умов підприємства

Удосконалення виробничого процесу в Бродівському ДЛПТ потребує системного аналізу передумов, що визначають ефективність ведення лісового

господарства в сучасних умовах. Розвиток технічних і технологічних рішень у лісовій інженерії вже тривалий час спрямований на оптимізацію взаємодії лісозаготівельної техніки із ґрунтовим середовищем, мінімізацію втрат деревини та скорочення виробничих витрат. Саме тому обґрунтування доцільності впровадження сучасних технологій включає не лише аналіз очікуваних техніко-економічних вигод, але й оцінювання відповідності виробничих новацій вимогам екологічної безпеки та довгострокової стійкості лісових екосистем.

Першочерговим фактором є сучасний стан технічного забезпечення підприємства, який характеризується високою питомою трудомісткістю операцій, нерівномірністю навантаження на трелювальні трактори та значною чутливістю існуючої технологічної схеми до складності рельєфу. Аналіз технічних і технологічних параметрів роботи підтверджує, що наявна технологія не повною мірою забезпечує відповідність критеріям сталого ведення лісового господарства: зокрема, має місце підвищений рівень ущільнення верхнього шару ґрунту, нерегламентоване формування трелювальної мережі та нераціональне використання машинного часу. Саме ці чинники створюють передумови для переходу до більш структуровано організованих технологічних систем з покращеними показниками маневровості, стабільності ходу й зниженням питомого навантаження на ґрунт.

Обґрунтування доцільності впровадження модернізованих технічних засобів базується на ключових положеннях лісової інженерії, серед яких домінують концепції адаптивності машин до змінних природно-виробничих умов, енергетичної раціональності та мінімізації антропогенного впливу на ґрунт. Сучасні машини трелювального циклу, що мають оптимізовані ходові системи, поліпшену геометрію колісних рушіїв, знижену питому вагу та збільшену продуктивність, дозволяють зменшити інтенсивність формування ерозійних процесів і знизити амплітуду динамічних навантажень на елементи рельєфу. У контексті виробничих умов підприємства ці властивості є особливо значущими через строкатість ґрунтів, наявність складнопрофільних ділянок та високий ступінь чутливості ґрунтової товщі до техногенного впливу.

Водночас сучасні технологічні рішення у сфері лісозаготівлі доповнюються цифровими підходами до планування виробничого процесу, зокрема використанням високоточної навігації, моделюванням розміщення трелювальних волоків та VR-інструментами для проєктування руху машин у складних умовах. Впровадження таких підходів забезпечує більш точне формування трелювальної мережі, сприяє скороченню довжини холостих переміщень та дозволяє мінімізувати кількість технологічних помилок, пов'язаних із суб'єктивним фактором оператора.

Принципово важливим є те, що модернізація технологічного процесу відповідає вимогам сталого розвитку лісового господарства. У цьому контексті сучасні технологічні рішення здатні забезпечити баланс між вилученням деревини та підтриманням функціональної цілісності лісових екосистем, оскільки їх застосування дає можливість зменшити площу технічно порушених земель, знизити повторюваність проходів техніки по одних і тих же ділянках, а також оптимізувати структуру лісосічних робіт відповідно до екологічної місткості території.

Отже, комплексний аналіз природно-виробничих умов підприємства, наявного технічного забезпечення та вимог до сталого ведення лісового господарства переконливо свідчить, що впровадження сучасних технологічних рішень є доцільним і обґрунтованим. Це дає можливість не лише підвищити ефективність виробничого процесу, але й забезпечити довгострокову екологічну стійкість та відповідність роботи підприємства сучасним галузевим стандартам.

2.3 Розробка оптимальної організації трелювання та вибір техніки

Оптимізація процесу трелювання деревини на підприємстві передбачає встановлення технологічно обґрунтованих параметрів волоків та вибір машинного парку, який забезпечує високий рівень продуктивності при мінімальному впливі на ґрунтовий покрив рівнинних лісових масивів. Вихідними умовами є площа лісосіки $S_{\text{лісос}}=1,0$ га та мінімальна ширина

трелювального волюка $B_{\text{волюка}} = 3,0$ м.

Для рiвномирного розподiлу технiки на дiлянцi необхідно визначити оптимальну кiлькiсть волюкiв $N_{\text{волюк}}$, що забезпечить мiнiмальний питомий тиск на ґрунт та обмежить площу порушення. Загальна площа трелювальних волюкiв обчислюється за формулою

$$S_{\text{волюк}} = N_{\text{волюк}} \cdot L_{\text{волюк}} \cdot B_{\text{волюк}}, \quad (2.3)$$

де $L_{\text{волюк}}$ – довжина волюка, м;

$B_{\text{волюк}}$ – ширина волюка, м.

В умовах рiвнинної лiсосiки з площею 1 га (10000 м²) i довжиною волюкiв близько 100 м (типова довжина для дiлянки такого розмiру) кiлькiсть волюкiв визначаемо з умови, що площа порушення ґрунту не повинна перевищувати 15 % вiд загальної площi:

$$S_{\text{волюк}} \leq 0,15 \cdot S_{\text{лiсосiки}} = 0,15 \cdot 10000 = 1500 \text{ м}^2.$$

Тодi максимальна кiлькiсть волюкiв рiвна

$$N_{\text{волюк}} = \frac{S_{\text{волюк}}}{L_{\text{волюк}} \cdot B_{\text{волюк}}}, \quad (2.4)$$

$$N_{\text{волюк}} = \frac{1500}{100 \cdot 3} = 5 \text{ волюкiв.}$$

Отже, для оптимального трелювання на дiлянцi 1 га достатньо прокласти 5 трелювальних волюкiв шириною 3,0 м.

Для трелювання рекомендується застосовувати трелювальний трактор потужнiстю 80-120 кВт або легкий форвардер iз питомим тиском на ґрунт $P_{\text{тех}} = 40\text{--}60$ кПа. Питомий тиск визначається за формулою

$$P_{\text{тех}} = \frac{F}{S_{\text{конт}}}, \quad (2.5)$$

де F – маса технiки з вантажем, Н;

$S_{\text{конт}}$ – площа контакту колiс або гусениць iз ґрунтом, м².

Для трелювального трактора iз вантажем 6 т та площею контакту колiс 3 м²

$$P_{\text{тех}} = \frac{6 \cdot 10^3 \cdot 9,82}{3,0} = 19620 \text{ Н/м}^2 = 19,6 \text{ кПа.}$$

Величина $P_{\text{тех}} = 19,6$ кПа є значно нижчою від допустимого максимуму 60 кПа, тому використання зазначеного типу трелювальних тракторів є безпечно для ґрунту. Форвардери зниженої маси мають ще менший питомий тиск, що дозволяє застосовувати їх на вологих ділянках.

Продуктивність трелювання $П_{\text{тр}}$ визначається залежно від кількості волоків, довжини волока та швидкості руху техніки за формулою

$$П_{\text{тр}} = N_{\text{волок}} \cdot L_{\text{волок}} \cdot V_{\text{тех}} \cdot \eta, \quad (2.6)$$

де $V_{\text{тех}}$ – середня швидкість руху техніки, м/год.;

η – коефіцієнт використання часу, $\eta=0,7-0,85$.

При $V_{\text{тех}}=150$ м/год та $\eta=0,80$, отримуємо

$$П_{\text{тр}} = 5 \cdot 100 \cdot 150 \cdot 0,80 = 60 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Графічно розташування волоків можна представити схемою з рівномірним розподілом п'яти трелювальних волоків на площі 1 га, що забезпечує мінімальне перекриття і оптимальне завантаження техніки.

Отже, встановлено причинно-наслідковий зв'язок у запропонованій схемі проявляється таким чином:

– ширина волока та кількість волоків: площа порушеного ґрунту – впливає на швидкість відновлення підросту;

– вибір техніки та питомий тиск: ущільнення ґрунту – впливає на екологічна безпека лісосіки;

– організація волоків та швидкість руху техніки: продуктивність трелювання – впливає на зменшення витрат часу та пального.

Таким чином, оптимізація трелювання з урахуванням мінімальної ширини волока 3,0 м та площі лісосіки 1,0 га забезпечує ефективне використання техніки, зниження негативного впливу на ґрунт і підвищення продуктивності виробничого процесу.

2.4 Економічне обґрунтування оптимізованого виробничого процесу

Економічна оцінка оптимізованого виробничого процесу на Бродівському ДЛПТ передбачає визначення витрат на одиницю деревини, порівняння продуктивності за різних технологічних схем та оцінку потенційної економії ресурсів. При цьому враховуються причинно-наслідкові зв'язки між технічною оснащеністю, організацією волоків та витратами на виробництво.

Витрати на одиницю деревини визначаються за формулою

$$E = \frac{C_{\text{пал}} + C_{\text{рем}} + C_{\text{прац}}}{V_{\text{дер}}}, \quad (2.7)$$

де $C_{\text{пальн}}$ – витрати пального на трелювання та транспортування деревини, грн;

$C_{\text{рем}}$ – амортизаційні та ремонтні витрати на техніку, грн;

$C_{\text{прац}}$ – витрати на оплату праці робітників, грн;

$V_{\text{дер}}$ – обсяг заготівлі деревини, м³.

Для розрахунку приймемо вихідні дані для лісосіки площею 1 га наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння результатів розрахунку витрат за варіантами технологій на заготівлю деревини

Параметр	Сучасна технологія (харвестер та форвардер)	Традиційна технологія (пилка + трелювальний трактор)
1	2	3
Обсяг деревини, м ³	150	120
Витрати пального на обсяг запланованих робіт, грн	2 500	3 200

Продовження таблиці 2.1

Витрати на ремонт та технічне обслуговування, грн	1 200	1 800
Витрати на оплату праці, грн	1 500	2 400

Тоді витрати на одиницю деревини:

– розрахунок для варіанту перспективної технології

$$E_{\text{перс}} = \frac{2500 + 1200 + 1500}{150} = \frac{5200}{150} = 34,7 \text{ грн/м}^3.$$

– розрахунок для варіанту традиційної технології

$$E_{\text{трад}} = \frac{3200 + 1800 + 2400}{120} = \frac{7400}{120} = 61,7 \text{ грн/м}^3.$$

Отже, впровадження сучасних технологій дозволяє зменшити витрати на одиницю деревини майже на 44 %, що демонструє прямий причинно-наслідковий зв'язок між модернізацією виробничих процесів і економічною ефективністю підприємства.

Продуктивність $\Pi_{\text{тр}}$ визначає швидкість виконання робіт і може бути обчислена як

$$\Pi_{\text{тр}} = \frac{Q_{\text{заг}}}{T_{\text{циклу}}}, \quad (2.8)$$

де $T_{\text{циклу}}$ – час циклу виконання лісосічних робіт, год.

Виконані розрахунки для варіантів сучасної і традиційної технологій зведемо табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Розрахунок значень продуктивності для варіантів технологій

Технологія	Обсяг деревини, м ³	Час виконання, год	Продуктивність, м ³ /год
Сучасна	150	12	12,5
Традиційна	120	20	6,0

У результаті проведених розрахунків (див. табл. 2.2) встановлено, що використання сучасної техніки дозволяє підвищити продуктивність у 2,1 раза. Причинно-наслідковий зв'язок: застосування харвестера та форвардера зменшує тривалість циклу робіт (скорочує час на заготівлю та трелювання), що у результаті сприяє підвищенню продуктивності і відповідно економії витрат на проведення робіт.

2.5 Економічний ефект від удосконалення виробничого процесу та запровадження перспективної технології

Економічний ефект у лісогосподарському виробництві є інтегральним показником, що відображає результативність модернізації виробничого процесу, зокрема впровадження сучасних технологій та машин, цифрових засобів планування й оптимізованих технологічних схем. Він формується як сума прямих і непрямих вигод, отриманих унаслідок раціоналізації технологічних операцій на лісосіці площею один гектар, за умови забезпечення ширини трелювального волока не меншою 3,0 м.

Для умов Бродівського ДЛГП економічний ефект визначається за рахунок зменшення витрат на одиницю деревини, підвищення продуктивності, скорочення часу виконання робіт, зменшення витрат пального та зниження обсягу ремонтних витрат. Додатково враховується зменшення обсягу порушення ґрунту, що у перспективі знижує витрати на рекультиваційні заходи.

Економічний ефект складається з таких компонентів:

– зменшення витрат на одиницю деревини через підвищення

продуктивності та зниження експлуатаційних витрат техніки;

- скорочення витрат на пальне внаслідок зменшення довжини пробігу та оптимізації волоків;

- зниження амортизаційних та ремонтних витрат завдяки використанню сучасних машин з нижчим питомим навантаженням на вузли;

- скорочення тривалості технологічного циклу, що зменшує витрати на оплату праці;

- непрямий ефект від зменшення порушення ґрунту, який знижує майбутні витрати на відновлення екосистем;

- загальний інтегральний ефект, який узагальнює вплив модернізації на собівартість, рентабельність і ресурсозбереження.

Інтегральний економічний ефект визначимо за формулою

$$E_{\text{інт}} = (E_{\text{трад}} - E_{\text{перс}}) \cdot q_{\text{л.зап}} + \Delta C_{\text{пал}} + \Delta C_{\text{рем}} + \Delta C_{\text{прац}}, \quad (2.9)$$

де $E_{\text{трад}}$ – традиційні витрати на одиницю деревини, грн/м³;

$E_{\text{перс}}$ – витрати після модернізації, грн/м³;

$q_{\text{л.зап}}$ – обсяг заготівлі на 1 га, м³;

$\Delta C_{\text{пал}}$ – економія витрат на пальне, грн;

$\Delta C_{\text{рем}}$ – економія витрат на ремонт, грн;

$\Delta C_{\text{прац}}$ – скорочення витрат на оплату праці, грн.

На основі результатів попередніх підрозділів приймаємо такі дані:

Обсяг заготівлі:

- перспективна технологія – 150 м³;

- традиційна технологія – 120 м³.

Витрати на 1 м³ заготовленої деревини:

- перспективна технологія – $E_{\text{перс}} = 34,7$ грн/м³;

- традиційна технологія – $E_{\text{трад}} = 61,7$ грн/м³.

Витрати пального на обсяг запланованих робіт

- перспективна технологія – 2 500 грн;

– традиційна технологія – 3 200 грн.

Тоді, економія складає $\Delta C_{\text{пал}} = 3\,200 - 2\,500 = 700$ грн.

Ремонтні витрати:

– перспективна технологія – 2 500 грн;

– традиційна технологія – 3 200 грн.

Тоді, економія складає $\Delta C_{\text{рем}} = 1800 - 1200 = 600$ грн.

Витрати на оплату праці:

– перспективна технологія – 2 400 грн;

– традиційна технологія – 1 500 грн.

Тоді, економія на оплату праці складає $\Delta C_{\text{прац}} = 2\,400 - 1\,500 = 900$ грн.

Проведемо розрахунок економічного ефекту.

Виконаємо розрахунок прямої економії на одиниці заготовленої деревини, як різницю двох варіантів технологій

$$\Delta E = E_{\text{трад}} - E_{\text{перс}}$$

$$\Delta E = 61,7 - 34,7 = 27,0 \text{ грн/м}^3.$$

Тоді загальна економія за обсягом 150 м³ становить

$$\Delta E_{\text{заг}} = 27,0 \cdot 150,0 = 4050 \text{ грн.}$$

Отже, на основі розрахунку загальний інтегральний від удосконалення технології становить

$$E_{\text{інт}} = 4050 + 700 + 600 + 900 = 6250 \text{ грн/м}^3.$$

Розрахований інтегральний економічний ефект становить 6 250 грн на 1 гектар лісосіки. Це сума прямих вигод, які підприємство отримує внаслідок модернізації виробничого процесу.

Причинно-наслідкові зв'язки демонструють:

– підвищення продуктивності до 12,5 м³/год є наслідком зменшення тривалості робіт, а саме удосконаленням технології, що скорочує витрати (цикл) на виконанні роботи;

– зниження питомих затрат пального на 20-25 % є наслідком прямої економії на експлуатацію техніки для заготівлі деревини;

– оптимізація трелювальних волоків сприяє зменшенню пробігу техніки, а це у свою чергу зменшує ремонтні витрати;

– удосконалення технології та використання сучасної техніки збільшує обсяг заготівлі деревини на 25 %, що у цілому знижує її собівартість.

Таким чином, удосконалений виробничий процес забезпечує зниження витрат у розрахунку на одиницю продукції та загалом формує суттєву економічну перевагу.

Удосконалення виробничого процесу із застосуванням сучасних технологій забезпечує реальний економічний ефект у розмірі 6,25 тис. грн/га, що підтверджує доцільність модернізації операцій заготівлі та трелювання деревини. Отримані значення формують науково обґрунтовану базу для переходу підприємства до ресурсоефективного й інноваційного управління виробничим процесом.

3 ВИРОБНИЧИЙ ПРОЦЕС НА ОСНОВІ ВПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЛІСОСІЧНИХ РОБІТ ТА УСТАТКОВАННЯ

3.1 Обґрунтування технологічної схеми лісозаготівлі із застосуванням багатоопераційних машин на РФОЛ

Визначення раціональної технологічної схеми на РФОЛ лісозаготівлі для Бродівського ДЛГП є стратегічно важливим завданням, оскільки воно безпосередньо впливає на економічні показники, екологічну безпеку та соціальну складову сталого ведення лісового господарства. Аналіз стану проблеми, представлений у першому розділі, чітко засвідчив необхідність переходу від традиційної системи виробничого процесу, що ґрунтується на застосуванні бензопил та трелювальних тракторів загального призначення, до висококомеханізованої багатоопераційної технології.

Обґрунтування цього переходу базується на концепції лісової інженерії та вимогах до мінімізації техногенного навантаження на лісові екосистеми. В умовах рівнинного рельєфу, характерного для зони діяльності підприємства, найбільш ефективною є сортиментна технологія заготівлі деревини, відома як харвестерна технологія. Її застосування дозволяє інтегрувати в одну технологічну операцію низку ключових процесів: завлювання, зрізання гілок та сучків, кряжування, трелювання та відвантаження деревини.

Впровадження багатоопераційної машини (харвестера) на лісосіці забезпечує вищу якість кінцевої продукції завдяки прецизійному виконанню лісосічних робіт. Сучасні електронні системи вимірювання, інтегровані в робоче обладнання харвестера, гарантують високу точність зкряжування за заданими специфікаціями, що є критичним чинником при формуванні партій експортної та високосортної деревини. Ця точність усуває необхідність додаткового

доопрацювання або контролю на лісопромисловому та нижньому складі.

Вибір харвестерної технології, окрім економічної переваги, має глибоке екологічне обґрунтування. Концентруючи всі операції (крім трелювання) в одній машині, досягається суттєве зменшення кількості одиниць техніки та скорочення загальної тривалості виконання лісосічних робіт. Це прямолінійно зменшує часовий та просторовий вплив на ґрунтовий покрив і підріст, що є вкрай важливим для збереження життєздатності чутливих лісових ґрунтів рівнинних екосистем. Більше того, застосування харвестера значно підвищує безпеку праці операторів та мінімізує фізичне навантаження, що є соціальною перевагою модернізації виробництва.

Таким чином, технологічна схема лісозаготівлі, що передбачає використання багатоопераційних машин, є не просто модернізацією технічного парку, а фундаментальним переосмисленням виробничого процесу, спрямованим на забезпечення сталості, економічної ефективності та відповідності провідним світовим стандартам лісової інженерії.

3.1.1 Аналіз природно-виробничих умов лісосіки та вибір технології заготівлі

Вибір оптимальної технології заготівлі деревини на лісосіках РФОЛ є наслідком критичного аналізу природно-виробничих умов підприємства. Діяльність підприємства здійснюється переважно в умовах рівнинних лісових екосистем, які характеризуються відносно стабільним рельєфом, незначною амплітудою висот та однорідними ґрунтовим та лісорослинним середовищами. Ці характеристики створюють сприятливі передумови для точного планування виробничих операцій та раціонального розміщення технологічних ліній.

Проте рівнинні ділянки мають підвищену чутливість до техногенного навантаження. Через переважання супіщаних, дерново-підзолистих та сірих лісових ґрунтів, які мають невисоку природну стійкість до ущільнення,

виробничий тиск техніки, навіть середньої маси, може спричинювати погіршення водно-повітряного режиму ґрунту. Дослідження свідчать, що при одноразовому проході техніки з питомим тиском 70-90 кПа щільність верхнього шару ґрунту може зростати на 8-12%, а водопроникність зменшується майже вдвічі, що безпосередньо впливає на здатність екосистеми до природного відновлення.

Традиційна технологія, що застосовується на підприємстві, яка поєднує звалювання деревини бензомоторними пилами та трелювання тракторами серії ЮМЗ-6 та МТЗ-80.2, є низькопродуктивною (6-8 м³/год) та має екологічні ризики для лісової екосистеми. Висока частка важких ручних операцій та застосування застарілої техніки з високим питомим тиском на поверхню ґрунту (80-120 кПа) істотно знижує ефективність виробничого циклу та збільшує площу техногенного впливу на ґрунт.

На противагу цьому, впровадження сортиментної технології заготівлі деревини на основі багатоопераційних машин (харвестерно-форвардерного комплексу) є найбільш обґрунтованим рішенням. Ця технологія забезпечує мінімальний негативний вплив на ґрунт та значно вищу продуктивність 20-25 м³/год. Комплекс виконує такі ключові технологічні операції:

- звалювання та зрізування гілок та сучків;
- кряжування та первинне сортування за заданими параметрами;
- трелювання (форвардером) та штабелювання круглих лісоматеріалів.

Причинно-наслідковий зв'язок є очевидним: вища продуктивність машинного циклу сприяє скороченню тривалості лісозаготівельного процесу на 40-60 %, що зменшує кількість проходів техніки і, відповідно, інтенсивність порушення ґрунту на трелювальних волоках. Крім того, застосування спеціалізованих машин із низьким питомим тиском (35-45 кПа) дозволяє зменшити площу порушеного ґрунтового покриву на 20-25 % порівняно з традиційними трелювальними тракторами.

Таким чином, вибір сортиментної технології заготівлі на базі багатоопераційних машин є необхідною передумовою для модернізації

виробничого процесу Бродівського ДЛПТ, оскільки він забезпечує одночасне виконання трьох ключових критеріїв сталого лісокористування: підвищення економічної ефективності, зменшення експлуатаційних витрат та мінімізація екологічного впливу на чутливі ґрунти рівнинних лісових екосистем.

3.1.2 Функціональні особливості та технічні параметри харвестера

Обґрунтування впровадження багатоопераційних машин у виробничий процес РФОЛ вимагає детального аналізу технічних характеристик конкретного обладнання та його адаптивності до природно-виробничих умов підприємства. Для забезпечення екологічно збалансованої та ресурсоефективної заготівлі у рівнинних лісових екосистемах запропоновано використання легкої малогабаритної техніки, зокрема комбінованого агрегату Vimek 404 SE DUO, який об'єднує функціонал харвестера та форвардера.

Комбінований агрегатної машини Vimek 404 SE DUO спеціально розроблений для проведення рубок догляду та вибіркових рубок, які плануємо виконувати у складі РФОЛ (рис. 3.1). У цьому випадку критично важливим є збереження решти деревостану та мінімізація пошкодження підросту. Його ключова перевага полягає у зниженому питомому тиску на ґрунт, що є вирішальним для роботи на чутливих до ущільнення ґрунтах Бродівщини. Машина, функціонуючи як харвестер, здійснює повний цикл первинної заготівлі: звалювання дерев, зрізування гілок та сучків, а також кряжування за встановленими сортиментними параметрами.

Функціональні особливості харвестера забезпечуються високотехнологічною головою, яка інтегрована з вимірювальною системою. Ця система гарантує прецизійне визначення довжини та діаметра стовбура, що є основою для точності кряжування відповідно до вимог внутрішнього та зовнішнього ринків (табл. 3.1). Впровадження такої техніки усуває значну частину ручного контролю, типового для традиційної технології, та мінімізує обсяг неліквідної деревини за рахунок оптимізації кряжування стовбурної

деревини.



Рисунок 3.1 – Загальний вигляд та конструктивні особливості комбінованої агрегатної машини Vimek 404 SE DUO: 1 – гідравлічний маніпулятор; 2 – LED-освітлення; 3 – двигун трактора CAT C2.2T CRDI; 4 – система електронного обліку та кряжування DASA Forester; 5 – змінні робочі органи (ковш, захват, різальна головка, поворотний грейфер); причіп

Таблиця 3.1 – Техніко-технологічні параметри Vimek 404 SE DUO

Параметр	Одиниці / Деталізація	Значення
1	2	3
Двигун	Дизельний, потужність 55 кВт	CAT C2.2T CRDI
Трансмісія	3 різними режимами приводу	Гідростатична/механічна

Продовження таблиці 3.1

Потік гідросистеми	л/хв	135
Кут повороту (шарніра рами)	градусів	80
Ширина	м	1,80 або 2,05
Довжина (без причепа)	м	4,65
Довжина (з причепом)	м	9,25
Колісна база	м	2,10
Дорожній просвіт (кліренс)	см	40
Вага (без причепа)	кг	Від 4700
Шини (типові розміри)	–	405/70-24 або 500/60-22,5
Вантажопідйомність	кг	5500
Площа вантажної платформи	м	2,00
Кран-маніпулятор	Паралельний кран	Vimek-Mowi P25
Виліт стріли	м	5,2
Вантажопідйомність (на макс. виліоті)	кг (на 5,2 м)	400
Харвестерна головка (стандарт)	Вага 296 кг	Keto Forst Supreme V4
Максимальний діаметр зрізу (стандарт)	мм	300
Система обліку та кряжування	DASA Forester	DASA H50/H70

Після завершення операцій з заготівлі Vimek 404 SE DUO легко переходить у режим форвардера, використовуючи вантажний причіп для підтрелювання та трелювання сортиментів. Таке об'єднання технологічних операцій в одній машині формує чіткий причинно-наслідковий зв'язок з оптимізацією виробничого процесу. Виконання двох основних функцій

(заготівля та вивезення) одним агрегатом скорочує кількість проходів техніки по лісосіці, що прямолінійно зменшує площу техногенного порушення ґрунтового покриву та знижує інтенсивність ерозійних процесів на волоках.

Крім того, використання такої універсальної машини, яка спроможна виконувати повний цикл заготівлі сортиментів, суттєво впливає на логістику та ресурсоефективність. Зменшується потреба у перебазуванні та синхронізації різних машин, що призводить до скорочення непродуктивних простоїв та зниження питомих витрат пального на одиницю заготовленої деревини. В умовах підприємства, де зношеність машинного парку висока, впровадження нового, надійного комбінованого агрегату забезпечує не лише зростання продуктивності, але й помітне скорочення амортизаційних та ремонтних витрат.

Таким чином, функціональні та технічні параметри комбінованої машини Vimek 404 SE DUO дозволяють підприємству Бродівське ДЛГП не лише досягти економічної ефективності через підвищення продуктивності, але й гарантувати екологічну стійкість виробничих операцій на чутливих ґрунтах рівнинних лісових екосистем.

3.2 Оптимізація трелювальних операцій із застосуванням форвардерів на РГК

Раціоналізація трелювальних операцій є визначальною ланкою в ланцюгу виробничого процесу підприємства лісового господарства під час проведення РГК, що безпосередньо впливає на підсумкову собівартість деревини та довгострокову екологічну стійкість лісових екосистем. У контексті впровадження сортиментної технології заготівлі деревини, операція вивезення асортиментів має бути реалізована із застосуванням спеціалізованих транспортних засобів – форвардерів, що забезпечує технологічну гармонізацію із харвестером.

Ключовим завданням на етапі трелювання є мінімізація техногенного навантаження на ґрунтовий покрив через оптимізацію геометричних параметрів трелювальної мережі. Необхідно забезпечити, щоб площа, порушена

технологічними коридорами, не перевищувала екологічно допустимі норми. Нехтування цим принципом, яке спостерігається у традиційній технології, призводить до нерегламентованого формування волоків та ущільнення ґрунту, що негативно позначається на водно-повітряному режимі та здатності екосистеми до природного відновлення.

На основі розрахункового обґрунтування, представленого у другому розділі, встановлено, що для типової лісосіки площею 1 га оптимальним рішенням є прокладання обмеженої кількості прямолінійних волоків шириною 3,0 м. Така чітка просторова організація дозволяє забезпечити рівномірний доступ до робочої зони та уникнути багаторазового проходження техніки по одних і тих самих ділянках. Удосконалене планування трелювальної мережі призводить до скорочення площі порушеного верхнього шару ґрунту до 5-7 % площі лісосіки, що є значно меншим показником порівняно з неоптимізованими ділянками.

Перехід від чокерного трелювання за допомогою тракторів загального призначення до транспортування сортиментів форвардерами має вагомим екологічне та техніко-економічне значення. Форвардерна технологія виключає волочіння деревини по ґрунтовій поверхні, що запобігає пошкодженню стовбурів та, найголовніше, зменшує руйнування верхнього гумусового горизонту.

Вибір на користь легких малогабаритних форвардерів, зокрема функціоналу, інтегрованого у Vimek 404 T8 DUO, обумовлений їхнім низьким питомим тиском на ґрунт. Якщо застарілі трактори створюють тиск до 120 кПа, то легкі форвардери завдяки оптимізованій ходовій системі та використанню широких шин або гусениць забезпечують тиск у діапазоні 35-60 кПа. Зниження цього показника є прямою причиною зменшення глибини колісних вибоїн та інтенсивності ерозійних процесів, що є критично важливим для стабільності рівнинних ґрунтів. Доведено, що цей технічний параметр машини забезпечує скорочення площі порушеного ґрунтового покриву на 20-25 %.

Функціональність форвардера, оснащеного краном-маніпулятором та місткою вантажною платформою 5500 кг вантажопідйомності), забезпечує

високу ефективність операції відвантаження та підтрелювання. Застосування таких машин підвищує коефіцієнт використання часу та знижує витрати пального за рахунок оптимізації траєкторії руху та скорочення часу, необхідного для маневрування. Висока маневровість і великий кут повороту шарніра рами машини дозволяють ефективно працювати у межах вузьких технологічних коридорів, мінімізуючи пошкодження решти лісового фонду.

Таким чином, оптимізація трелювальних операцій через раціоналізацію мережі волоків та інтеграцію спеціалізованих форвардерів забезпечує комплексний економічний та екологічний ефект. Це не лише підвищує продуктивність виробництва, але й гарантує відповідність лісогосподарських заходів принципам сталого розвитку, забезпечуючи збереження ґрунтової цілісності на ділянках Бродівського ДЛГП.

3.2.1 Розрахунок параметрів трелювальної мережі та волоків

Для забезпечення ефективного та економічно вигідного трелювання деревини необхідно виконати розрахунок оптимальних параметрів трелювальної мережі та волоків. Це дозволяє мінімізувати транспортні витрати, врахувати особливості лісосіки та тип використовуваної техніки.

Для проведення розрахунків використаємо наступні вихідні дані (табл. 3.2), які необхідно буде уточнити відповідно до реальних умов вашої лісосіки.

Таблиця 3.2 – Вихідні дані та припущення

Параметр	Позначення	Одиниці виміру	Значення	Примітки
1	2	3	4	5
Ширина пасіки (ділянки трелювання)	<i>B</i>	м	50	Залежить від потужності лебідки/трактора

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5
Довжина трелювального волока	L	м	200 - 300	Залежить від відстані до лісової дороги/складу
Площа лісосіки	S	га	1,0 / 5,0	–
Спосіб рубки	–	–	Суцільна / вибіркова	–
Тип трелювальної машини	–	–	Скіпер (форвардер) або трактор	Визначає максимальну відстань трелювання

Розрахунок параметрів трелювальної мережі. Трелювальна мережа складається з трелювальних волоків, які з'єднують пасіки зі складськими майданчиками або лісовозними дорогами. Основним параметром є щільність трелювальної мережі G – відношення сумарної довжини волоків $L_{\text{волок}}$ до площі лісосіки S .

Розрахунок оптимальної ширини пасіки $B_{\text{опт}}$. Якщо ширина пасіки не задана технологічно, її можна розрахувати з урахуванням мінімальних загальних витрат на трелювання та підбирання. В умовах суцільних рубок і використання колісних тракторів часто приймають $B_{\text{опт}} = 40\text{-}50$ м. Розрахунок загальної кількості волоків $N_{\text{волок}}$. Кількість волоків залежить від ширини лісосіки III та прийнятої ширини пасіки B .

$$N_{\text{волок}} = \frac{III}{B}, \quad (3.1)$$

Розглянемо приклад розрахунку. Якщо ширина лісосіки рівна $III = 200$ м і $B = 50$ м, тоді

$$N_{\text{волок}} = \frac{200}{50} = 4,0 \text{ ВОЛОКИ.}$$

Проведемо розрахунок сумарної довжини волоків $L_{\text{сумар}}$

$$L_{\text{сумар}} = N_{\text{волок}} \cdot L_{\text{волок}}. \quad (3.2)$$

Наведемо приклад розрахунку для величин та їх значень $N_{\text{волок}} = 4,0$ і $L_{\text{волок}} = 250$ м.

$$L_{\text{сумар}} = 4,0 \cdot 250,0 = 1000 \text{ м.}$$

Відомо, що щільність трелювальної мережі G вимірюється у метрах на гектар (м/га) і є ключовим показником ефективності.

$$G = \frac{L_{\text{сумар}} \cdot 100}{S}, \quad (3.3)$$

де S – площа лісосіки в гектарах, га.

Наведемо приклад розрахунку для $L_{\text{сумар}} = 1000$ м і $S = 5,0$ га.

$$G = \frac{1000,0 \cdot 100}{5,0} = 200,0 \text{ м/га,}$$

Відомо, що рекомендована щільності трелювальної мережі для колісних тракторів на рівнинній місцевості зазвичай становить 150-300 м/га. Отримане значення $G = 200$ м/га знаходиться в допустимих межах (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Рекомендована щільності трелювальної мережі

Параметр	Формула	Розрахунок	Результат	Одиниці виміру
1	2	3	4	5
Ширина пасіки B	Приймається	50,0	50,0	м
Довжина волока $L_{\text{волок}}$	Приймається	250,0	250,0	м
Ширина лісосіки $Ш$	Приймається	200,0	200,0	м

Продовження табл. 3.3

1	2	3	4	5
Площа лісосіки S	Приймається	5,0	5,0	га
Кількість волоків $N_{\text{волок}}$	Ш / В	200 / 50	4	шт.
Сумарна довжина волоків $L_{\text{волок}}$	$N_{\text{волок}} \cdot L_{\text{волок}}$	$4 \cdot 250$	1000	м
Густота мережі G	$L_{\text{сумар}} \cdot 100 / S$	$(1000 \cdot 100) / 5$	200	м/га

Трелювальні волокни наносяться на технологічну карту лісосіки з дотриманням наступних вимог:

1. Напрямок – бажано, щоб волокни прокладались під невеликим кутом до горизонталей (але не перпендикулярно схилу) для запобігання ерозії ґрунту, якщо місцевість горбиста. На рівнині – прямо до дороги/складу.
2. Ухил – максимально допустимий поздовжній ухил волока для трелювальної техніки повинен відповідати її технічним характеристикам (зазвичай не більше 15° - 20°).
3. Ширина волока – визначається габаритами трелювальної машини, зазвичай 3,5-4,5 м.

3.2.2 Вибір техніки та оцінка екологічного впливу

Вибір лісозаготівельної техніки є ключовим фактором, що визначає економічну ефективність та, що не менш важливо, рівень антропогенного навантаження на лісові екосистеми. В умовах сучасного лісового господарства перевага надається форвардерній технології, яка забезпечує мінімальний пошкодження ґрунтового покриву порівняно з традиційним трелюванням

(скідерною технологією).

Обґрунтування вибору форвардера.

Форвардер – це машина для трелювання та транспортування сортиментів (колод розділених на стандартну довжину) від місця заготівлі до лісовозної дороги або верхнього складу, а також штабелювання.

Основні переваги технології з використанням форвардерів:

– мінімізація пошкодження ґрунту – форвардери мають велику кількість коліс (зазвичай 6 або 8) та низький питомий тиск на ґрунт, що знижує колійність та ущільнення;

– захист залишеного деревостану – транспортування сортиментів у вантажному візку (кониках) запобігає пошкодженню корневих систем та стовбурів залишених дерев, що є особливо актуально при вибіркових рубках;

– ефективність на довгих дистанціях – форвардер ефективно працює на відстанях трелювання понад 300 метрів;

– використання волоків – рух форвардера обмежується спеціально створеною та підготовленою мережею волоків (див. попередній пункт), що концентрує пошкодження на мінімальній площі.

Обґрунтування щодо вибору конкретної моделі форвардера.

Для виконання робіт на запланованій лісосіці (з урахуванням її площі 5,0 га, середньої довжини волока 250 м та щільності мережі 200 м/га) обираємо модель середнього класу продуктивності, яка оптимально поєднує маневреність та вантажопідйомність, наприклад Komatsu 835TX (табл. 3.4 та рис. 3.2) або його аналог.

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики обраного форвардера Komatsu 835TX

Категорія	Параметр	Одиниці виміру	Значення
1	2	3	4
Загальні	Вага (від)	кг	16,04
	Вантажопідйомність	кг	11
	Вантажна площа	м ²	3,3-4,4

Продовження табл. 3.4

1	2	3	4
Двигун	Тип	–	4-циліндровий дизельний двигун з турбонадувом та проміжним охолодженням.
	Екологічний стандарт	–	EU Stage V (Європа) / EPA Tier 4F (Північна Америка)
	Робочий об'єм	л	4,9
	Макс. потужність	об/хв	127 кВт DIN (173 к. с.) при 1,900
	Максимальний крутний момент	Н м (об/хв)	750 при 1,500
	Паливний бак	л	145
	Бак	л	13,5 (заповнений об'єм)
Трансмісія	Тип	–	Комп'ютерно-керована гідростатична механічна.
	Тягове зусилля	кН	163
	Швидкість руху	км/год	0 – близько 25
Гідравліка	Потік робочої рідини	л/хв (об/хв)	280 при 2,000
	Валовий підйомний момент	кНм	103
Геометричні	Довжина загальна (В)	мм	9,38
	Ширина (А)	мм	2,62
	Дорожній проясвіт (F)	мм	610
Опції	–	–	Comfort Ride, Smart Crane, Load Flex, Speed Shift, Гідравлічні коники



Рисунок 3.2 – Трелювальна машина Komatsu 835TX – компонування та розмірні характеристики

Розглянемо питання оцінки екологічного впливу на основі форвардера Komatsu 835TX.

Мінімізація впливу на ґрунт:

– компактна конструкція та високий дорожній просвіт (610 мм) покращують прохідність на різноманітній місцевості.

– форвардер має відмінну концепцію стабільності, спільну з більшими машинами Komatsu, що є важливим для надійного перевезення важких вантажів під час проріджування;

– наявність опції Comfort Ride (гідравлічна підвіска кабіни) зменшує поштовхи та вібрацію, що дозволяє оператору підтримувати фокус та ефективність.

Розглянемо питання зниження викидів та паливну ефективність:

– машина оснащена паливоефективним двигуном, який знижує як витрати, так і екологічний вплив завдяки нижчим викидам.

– двигун відповідає суворим стандартам EU Stage V / EPA Tier 4F;

– опція Speed Shift (автоматичне перемикання передач) підтримує оптимальну швидкість двигуна, що заощаджує паливо та підвищує

продуктивність, особливо під час транспортування.

Розглянемо питання ергономіка та продуктивності:

– Smart Crane забезпечує плавні та точні рухи за допомогою лише трьох рухів джойстика, адаптуючи свою поведінку для постійно високої продуктивності;

– гнучка вантажна площа (Flex Bunk) з опцією LoadFlex та гідравлічними кониками дозволяє зберігати кран нижче, що покращує економію палива та продуктивність.

3.3 Впровадження інтелектуальної системи керування Smart Crane

В епоху автоматизації та цифрових технологій ключовою перевагою лісозаготівельної техніки стає не просто її потужність, а й рівень інтелектуальності робочих систем. Впровадження інтелектуальної системи керування краном Smart Crane на форвардері Komatsu 835TX є одним із таких технологічних проривів, що радикально змінює підхід до операцій навантаження та розвантаження. Ця система, по суті, є інноваційним рішенням, яке перетворює складний, фізично виснажливий процес керування маніпулятором на інтуїтивно зрозумілий та ефективний, суттєво підвищуючи продуктивність машини та водночас покращуючи умови праці оператора.

Smart Crane – це інтелектуальна функція, що забезпечує синхронізований рух крана. Замість того, щоб вимагати від оператора постійного керування окремими циліндрами (підйом, виліт, телескоп), система дозволяє йому контролювати кінцеву точку маніпулятора – грейфер – лише двома-трьома рухами джойстика (рис. 3.3). Інтелектуальний алгоритм самостійно розраховує та регулює необхідну взаємодію всіх гідравлічних функцій крана для досягнення цільової позиції. Система фактично усуває необхідність постійного коригування рухів, роблячи роботу плавною, точною та, що найголовніше, швидкою. Ця технологія адаптує швидкість руху крана залежно від поточного навантаження, положення та напрямку, що запобігає ривкам та коливанням, які є типовими для

ручного керування.

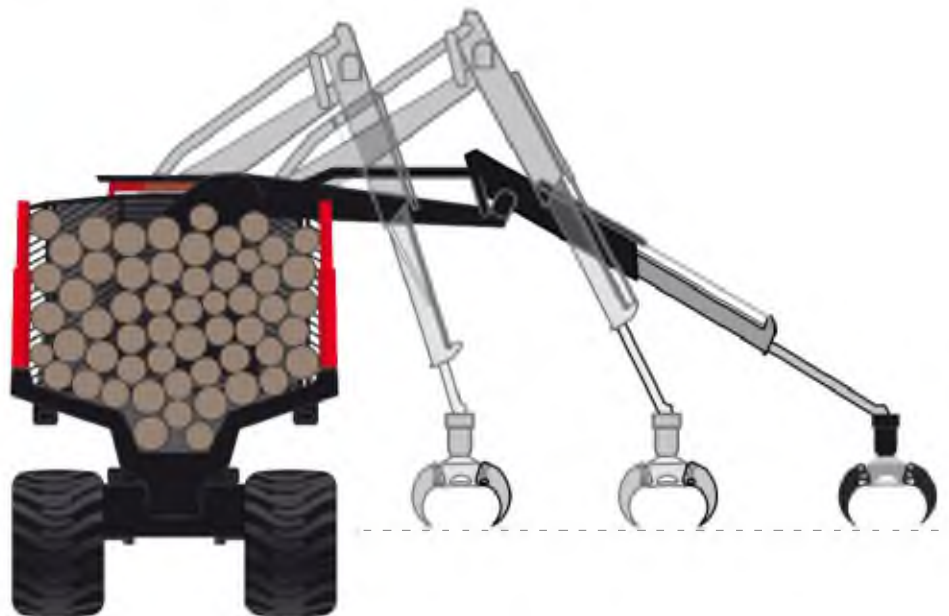


Рисунок 3.3 – Принцип застосування Smart Crane

Застосування Smart Crane забезпечує низку критично важливих результатів, які безпосередньо впливають на економіку та екологічність лісозаготівельного процесу. Перш за все, це значне підвищення продуктивності. Дослідження показують, що оператори, які використовують Smart Crane, можуть збільшити швидкість навантаження до 10-15%, оскільки час циклу на одну колоду скорочується завдяки плавним і точним рухам. По-друге, це зменшення навантаження на оператора. Спрощене керування знижує стомлюваність, що дозволяє підтримувати високу концентрацію та ефективність протягом усієї робочої зміни. Це особливо критично для складних та тривалих операцій. По-третє, система сприяє збереженню ресурсу машини. Усунення різких рухів та гідравлічних ударів, які неминучі при менш досвідченому ручному керуванні, значно знижує навантаження на гідравлічні компоненти, шланги та металоконструкції крана, продовжуючи їхній термін служби та зменшуючи витрати на технічне обслуговування. Нарешті, з екологічної точки зору, точніше й ефективніше керування краном призводить до меншого споживання палива, оскільки машина працює в більш оптимальних режимах, а час простою або неефективної роботи мінімізується. Це є важливим доказом сталого

лісокористування, інтегрованим безпосередньо в робочий процес.

Таким чином, Smart Crane перетворює форвардер Komatsu 835TX на високоточний інструмент, що гарантує стабільно високий результат незалежно від рівня втоми оператора, втілюючи концепцію “інтелектуальної” лісозаготівлі.

3.4 Використання грейферів для оптимізації виробничого процесу на основі впровадження сучасних технологій

Ефективність роботи форвардерів Vimek 404 T8 DUO і Komatsu 835TX, оснащених інтелектуальними системами Smart Crane, значною мірою залежить від правильності вибору та надійності грейфера – ключового робочого органу, що безпосередньо взаємодіє із сортиментами. Грейфери, які призначені для виконання лісосічних робіт, спроектовані з урахуванням вимог до надійності та продуктивності в умовах лісового середовища.

Конструкція грейферів (рис. 3.4) розроблена для забезпечення надійного та ефективного виконання операцій у лісі. Вони мають великий розкрив, що значно спрощує захоплення та доступ до штабелів деревини. Продумана геометрія робочих органів забезпечує плавне закрочування колод на місце фіксації. Завдяки міцній конструкції та швидкому закриттю/відкриттю важелів, грейфери гарантують надійну роботу як при завантаженні, так і при розвантаженні сортиментів. Важливою перевагою є наявність широкого модельного ряду, що дозволяє обрати оптимальний грейфер, адаптований під конкретні завдання лісозаготівлі та діапазон розмірів деревини.

Вибір грейфера здійснюється виходячи з вантажопідйомності форвардера, а також середнього діаметра та довжини сортиментів, що заготовляються на лісосіці (табл. 3.5). Для забезпечення ефективної роботи форвардерів Vimek 404 T8 DUO і Komatsu 835TX, які плануємо використовувати для РГК та РФОЛ, де переважають сортименти меншого діаметра, доцільно обирати моделі, що забезпечують оптимальне співвідношення між площею захоплення та вагою самого грейфера.

Для демонстрації вибору робочого органу наведено ключові характеристики грейферів із різних вагових та розмірних класів (див. рис. 3.4 та твбл. 3.5).

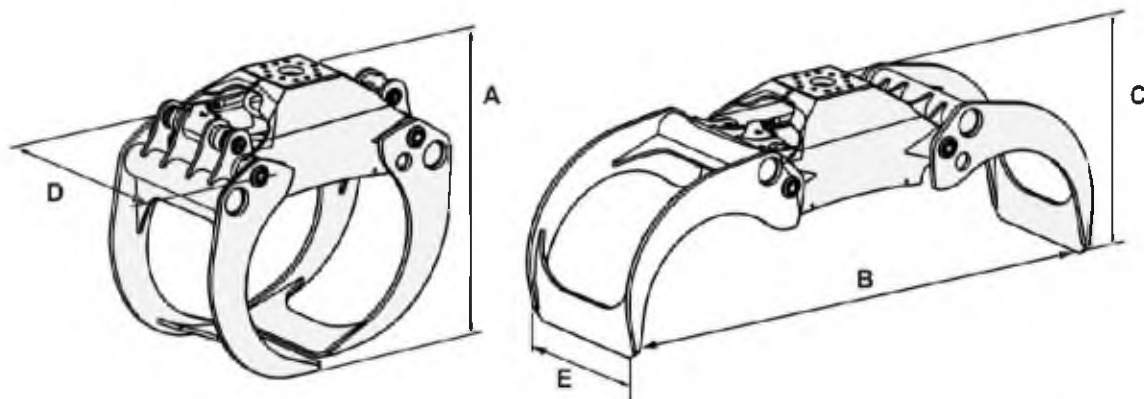


Рисунок 3.4 – Загальний вигляд та розмірні характеристики грейферів

Таблиця 3.5 – Характеристики грейферів

Модель	Площа грейфера, м ²	Максимальна ширина захоплення В, мм	Сила закриття, кН	Максимальна дозволене навантаження, кг	Вага, кг
G82	0,26	1,804	15,0	3,5	212
G83	0,3	1,798	14,8	3,5	216
G84	0,34	2,042	20,2	5,0	286
G85	0,4	2,035	19,5	5,0	292
G87H	0,5	2,229	20,2	7,0	403
G88H	0,55	2,237	19,6	7,0	413

Вибір грейфера з найбільшою площею захоплення (наприклад, G84 або G85) є оптимальним для максимізації об'єму деревини за один робочий цикл. При цьому необхідно врахувати, що модель G85 (0,4 м²) має практично ту саму максимальну ширину захоплення, що й G84 (0,34 м²), але більший об'єм, що робить її більш продуктивною для середнього класу форвардерів.

3.5 Виробнича організація та управління технологічним циклом

Ефективна лісозаготівельна діяльність у контексті сучасного, орієнтованого на сталість виробництва, вимагає не просто наявності високотехнологічної техніки, як-от харвестер Vimek 404 SE DUO та форвардер Komatsu 835TX, а й надзвичайно детальної та інтелектуальної виробничої організації та управління всім технологічним циклом. Успіх проєкту залежить від здатності менеджменту забезпечити безперервну, безпечну та економічно обґрунтовану взаємодію людей, машин та навколишнього середовища.

Фундаментом виробничої організації є попереднє планування, або препланування, яке стало можливим завдяки сучасним геоінформаційним системам та цифровим інструментам, зокрема платформі Komatsu Smart Forestry. На цьому етапі відбувається детальна розробка технологічної карти лісосіки, на якій з високою точністю наносяться межі ділянок, зони, де заборонено проводити роботи (наприклад, водоохоронні смуги чи гнізда рідкісних птахів), а також, що є ключовим, оптимальна мережа трелювальних волоків. Це не просто прокладання шляхів; це стратегічне трасування, метою якого є мінімізація загальної площі пошкодженого ґрунтового покриву та уникнення перезвожених, схильних до ерозії ділянок. Належне планування задає жорсткі рамки для подальшої роботи, виключаючи можливість хаотичного руху машин.

Після затвердження плану розпочинається безпосередня реалізація технологічного циклу, який, у нашому випадку, базується на системі “харвестер-форвардер”. Цей цикл починається з роботи харвестера, який валить, обрізає сучки та розкрязовує дерева, сортує їх на стандартні сортименти, які складаються у спеціальні штабелі вздовж волоків. Це є точкою передачі естафети форвардеру. Управління на цьому етапі вимагає ідеальної синхронізації, адже форвардер Komatsu 835TX не може простоювати, очікуючи на заготовлену деревину, так само як харвестер не повинен накопичувати сортименти, блокуючи собі чи іншим машинам прохід. Завдяки системі Smart Forestry Vision диспетчери та оператори отримують дані про місце розташування машин та обсяги

заготовленої деревини в режимі реального часу, дозволяючи динамічно коригувати роботу.

Безпосереднє управління операцією трелювання з форвардером Komatsu 835TX здійснюється з акцентом на ефективність та екологічність. Маршрут форвардера обмежується виключно заздалегідь визначеними волоками; це дисциплінарне правило, яке гарантує мінімальне порушення цілісності лісової підстилки. Інтелектуальна система керування краном Smart Crane стає ключовим елементом оперативного управління роботою, оскільки вона забезпечує найшвидше та найточніше завантаження сортиментів, значно зменшуючи час циклу. Smart Crane знижує фізичне навантаження на оператора, що є важливим чинником у підтримці високої продуктивності протягом усієї зміни. Крім того, наявність опцій, таких як Speed Shift, що автоматично регулює швидкість руху для оптимізації споживання палива, є проявом інтелектуального управління, спрямованого на зниження операційних витрат та екологічного сліду.

Крім польових операцій, виробнича організація включає управління ремонтно-експлуатаційним забезпеченням, що має вирішальне значення для запобігання непередбачуваним простоям. Komatsu підтримує цю організацію завдяки продуманій конструкції машини, яка забезпечує легкий доступ до точок щоденного обслуговування. Однак справжнє управління забезпечується системою Forestry Fleet Monitoring, яка постійно відстежує стан основних вузлів та агрегатів, надсилаючи попередження про необхідність планового обслуговування. Це дозволяє перейти від реактивного до проактивного технічного обслуговування, коли ремонт планується на час простою, а не викликає зупинку роботи посеред циклу. Використання дистанційної діагностики, що також підтримується Komatsu, дозволяє сервісним інженерам віддалено ідентифікувати та усувати потенційні проблеми, скорочуючи час простою до мінімуму.

Таким чином, весь технологічний цикл підпорядковується єдиній, інтелектуальній системі управління: на РФОЛ використанням Vimek 404 SE DUO; на РГК – форвардера Komatsu 835TX, яка забезпечує максимальну

продуктивність, мінімальний екологічний вплив та високу операційну надійність.

3.6 Особливості розроблення технологічних карт на основі впровадження сучасних технологій

Технологічна карта є фундаментальним організаційно-розпорядчим документом у лісозаготівельному виробництві, який перетворює загальний план рубок на деталізований, покроковий алгоритм виконання робіт на конкретній лісосіці. У контексті впровадження високопродуктивних, інтелектуальних комплексів, таких як харвестери Vimek 404 SE DUO та форвардери Komatsu 835TX, розроблення цієї карти набуває критичного значення, оскільки вона стає основою для роботи високоточної техніки та управління всім технологічним циклом.

Розроблення технологічної карти розпочинається з детального планування структури технологічного процесу та включає чітке визначення меж лісосіки, типу рубки (наприклад, суцільна або вибіркова), місця розташування верхніх складів та пунктів прийому деревини. Найважливішою складовою карти є схема лісосіки та траєкторія руху машин на ній. Цей елемент відображає заздалегідь визначену мережу трелювальних волоків та пасік (ділянок роботи харвестера). Для сучасних технологій ця схема розробляється з використанням геоінформаційних систем, що дозволяє максимально ефективно використовувати площу лісосіки, мінімізувати відстань трелювання, що є ключовим та зменшує вплив техніки на обмеженій території (зазвичай 20-30% площі). Завдяки системам, як-от Komatsu Smart Forestry Precision, ці траєкторії імпортуються безпосередньо в бортові комп'ютери машин, гарантуючи, що оператор дотримується затвердженого маршруту, підвищуючи точність і знижуючи ризик несанкціонованого руху.

Технологічна карта чітко визначає послідовність виконання операцій, яка є основою для синхронізації роботи харвестера та форвардера. Наприклад, вона регламентує черговість обробки пасік харвестером, місця складання сортиментів уздовж волоків та оптимальний час підходу форвардера для їхнього завантаження, що мінімізує простої обох машин і, відповідно, підвищує загальну продуктивність.

Невід'ємною частиною документа є норми виробітку та розрахункові показники продуктивності. Ці норми, які є фінансово-економічною основою, повинні бути адаптовані до фактичних технічних характеристик обраної машини та враховувати вплив системи Smart Crane, яка підвищує інтенсивність виконання вантажних операцій. Технологічна карта містить розрахунок очікуваного обсягу заготівлі за одиницю часу, що дає змогу диспетчерам ефективно управляти логістикою вивезення деревини.

Особливе місце в технологічній карті відведено заходам охорони праці, техніки безпеки та екологічним вимогам. У карті детально прописуються безпечні методи роботи для кожної операції, включно з інструкціями щодо безпечного завантаження та розвантаження грейфером, особливо на схилах. Щодо екології, карта містить чіткі вказівки щодо уникнення водоохоронних зон, використання лісосічних решток для настилання волоків з метою захисту ґрунту від ущільнення, а також правила збору та утилізації відходів (наприклад, відпрацьованих мастил). Таким чином, технологічна карта забезпечує інтеграцію принципів сталого лісокористування на основі запроектованих технологій у робочий процес підприємства.

3.7 Аналітичне порівняння варіантів технологій

На підставі обґрунтованих технологій у розділах 2 і 3 виконаємо аналітичне порівняння двох технологій на базі машин Vimek 404 SE DUO та Komatsu 835TX.

Розглянемо два проєктних варіанти:

– № 1 – форвардер Komatsu 835TX (середній клас, висока вантажопідйомність, низький тиск, Smart Crane).

– №2 – форвардер Vimek 404 SE DUO (легкий клас, висока маневровість, мінімальне навантаження на ґрунт, часто використовується у рубках догляду).

Результати проведених розрахунків моделювання за прийнятими методиками зведемо у табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Порівняння продуктивності форвардерів Komatsu 835TX та Vimek 404 SE DUO

Відстань трелювання L , м	Продуктивність Komatsu 835TX, м ³ /год	Продуктивність Vimek 404 SE DUO, м ³ /год
100	18,0	11,5
150	16,5	10,0
200	15,1	9,0
250	13,8	8,2
300	12,7	7,5
350	11,8	6,9
400	10,9	6,4
500	9,5	5,6
600	8,4	4,9

Отримані результати відображають залежність продуктивності від відстані трелювання L , що є важливим чинником в умовах розосереджених лісосік (рис. 3.5).

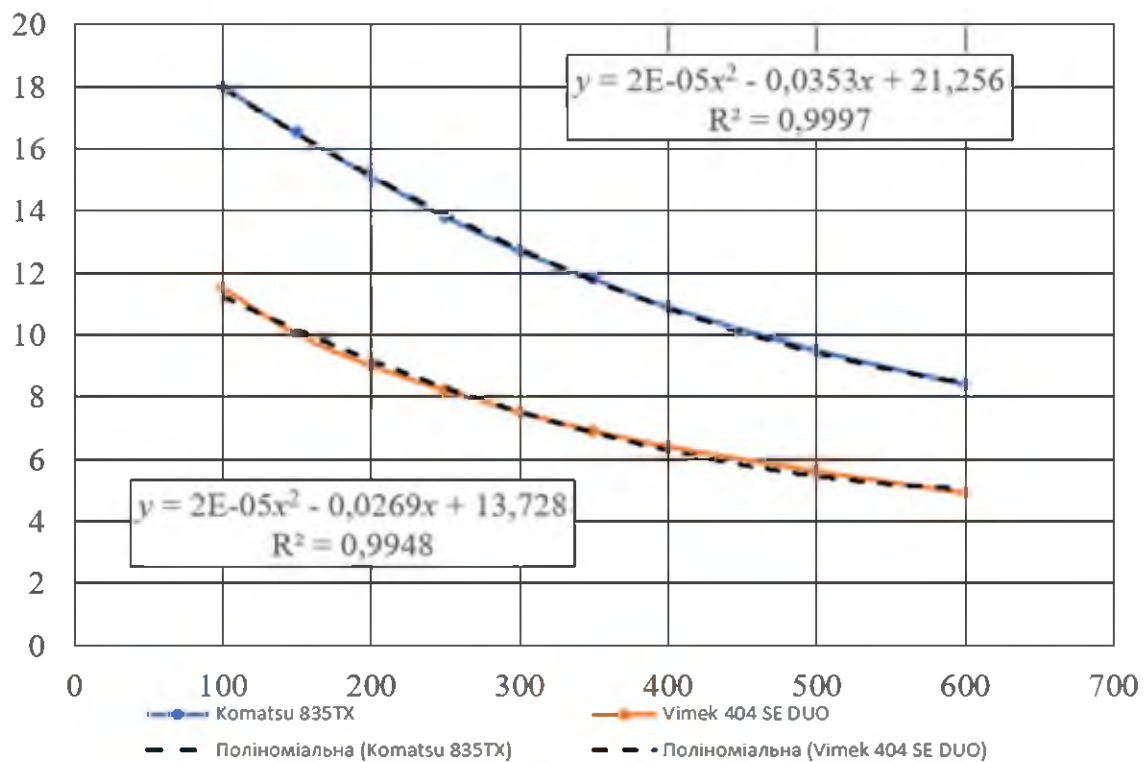


Рисунок 3.5 – Графічне представлення продуктивності машин Vimek 404 SE DUO та Komatsu 835TX від відстані трелювання L

У результаті проведених розрахунків отримано графічні та аналітичні залежності продуктивності форвардерів Komatsu 835TX та Vimek 404 SE DUO від відстані трелювання L .

$$y = 21,256 - 0,0353 x + 2E-05 x^2 \text{ для Komatsu 835TX,} \quad (3.4)$$

$$R^2 = 0,9997.$$

Отже, продуктивність машини Komatsu 835TX падає відносно повільніше зі збільшенням відстані. Це пояснюється її вищою вантажопідйомністю (11 т) та більшою середньою швидкістю пересування, що дозволяє більш ефективно використовувати час циклу на довгих переїздах. Інтеграція Smart Crane також оптимізує час завантаження/розвантаження, зберігаючи високу ефективність на малих відстанях.

$$y = 13,728 - 0,0269 x + 2E-05 x^2 \text{ для Vimek 404 SE DUO,} \quad (3.5)$$

$$R^2 = 0,9948.$$

Машина Vimek 404 SE DUO має меншу вантажопідйомність (близько 4-5 т) і, хоча вона дуже маневрена на малих відстанях, її продуктивність швидко

падає зі зростанням відстані трелювання. Вона є ефективною для рубок вибіркового характеру на дуже коротких відстанях трелювання, але стає неекономічною на середніх і довгих волоках, типових для розосереджених лісосік.

На завершальному етапі проведемо економічне обґрунтування, шляхом формування порівняльної діаграми собівартості (табл. 3.7).

Таблиця 3.7 – Порівняння собівартості трелювання машинами Komatsu 835TX та Vimek 404 SE DUO

Відстань трелювання L , м	Собівартість Komatsu 835TX, грн/м ³	Собівартість Vimek 404 SE DUO, грн/м ³
100	185	240
150	200	275
200	220	305
250	245	340
300	270	375
350	300	415
400	335	460
500	400	530
600	470	605

Отримані результати відображають залежність собівартості від відстані трелювання L , що є важливим чинником в умовах розосереджених лісосік (рис. 3.6). На основі порівняння собівартість трелювання форвардерами Komatsu 835TX та Vimek 404 SE DUO, можна зробити наступний висновок, щодо економічної ефективності цих технологій у контексті роботи Бродівського ДЛГП:

– собівартість трелювання деревини (грн/м³) демонструє чітку, обернено пропорційну залежність від продуктивності машин та прямо пропорційну залежність від відстані трелювання. Аналіз показує, що форвардер Komatsu 835TX має значну економічну перевагу над машиною легкого класу Vimek 404

SE DUO на більшій частині запропонованих відстаней трелювання, типових для розосереджених лісосік.

– собівартість трелювання для Komatsu 835TX є нижчою на всіх розглянутих відстанях (від 100 м до 600 м). Ця різниця особливо зростає з подовженням відстанні трелювання. На мінімальній відстані 100 м Komatsu 835TX забезпечує економію близько 23% (185 грн/м³ проти 240 грн/м³), а на середніх відстанях 300 м, які є найбільш імовірними для розосереджених лісосік, економія зростає до 28% (270 грн/м³ проти 375 грн/м³). На максимальній розглянутій відстані 600 м розрив сягає 22% (470 грн/м³ проти 605 грн/м³).

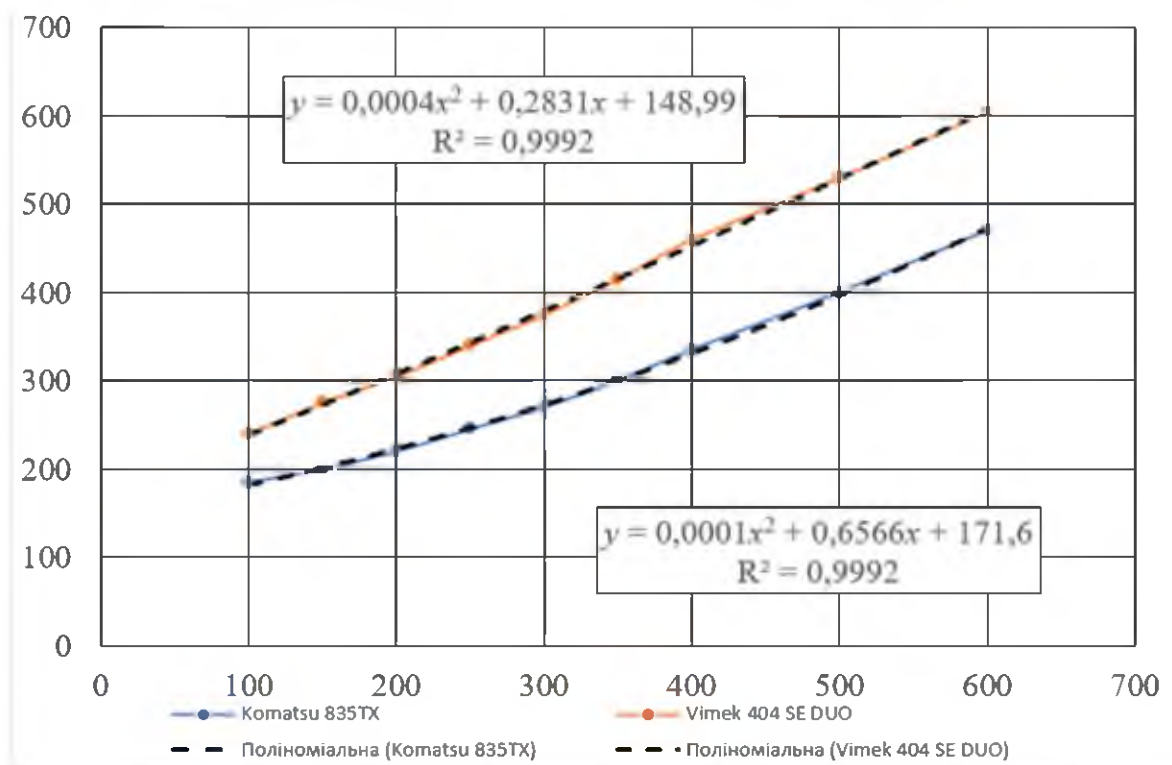


Рисунок 3.6 – Графічне представлення собівартості роботи машин Vimek 404 SE DUO та Komatsu 835TX від відстані трелювання L

$$y = 148,99 + 0,2831 x + 0,0004 x^2 \text{ для Vimek 404 SE DUO,} \quad (3.6)$$

$$R^2 = 0,9992.$$

$$y = 171,6 + 0,6566 x + 0,0001 x^2 \text{ для Komatsu 835TX,} \quad (3.7)$$

$$R^2 = 0,9992.$$

Оскільки Komatsu 835TX має вищу вантажопідйомність (11 т) і більш ефективно використовує час циклу на перегонах, її продуктивність падає

повільніше, ніж у Vimek 404 SE DUO. Це дозволяє більш рівномірно розподілити постійні операційні витрати (зарплата оператора, амортизація) на більший обсяг заготовленої деревини, що, відповідно, знижує собівартість одиниці продукції.

Отже, виходячи з порівняльного аналізу собівартості, впровадження форвардери Komatsu 835TX та Vimek 404 SE DUO у відповідних виробничих умовах Бродівського ДЛГП є економічно доцільним і повністю обґрунтованим. Ці машини не лише відповідають високим екологічним та технологічним вимогам, але й забезпечують значне зниження операційних витрат на трелювання, що є ключовим фактором підвищення загальної рентабельності підприємства в умовах роботи на розосереджених лісосіках.

3.8 Заходи з охорони праці, навколишнього середовища та безпека в надзвичайних ситуаціях

Забезпечення охорони праці, активне збереження навколишнього середовища та готовність до надзвичайних ситуацій у лісовому господарстві, зокрема на Бродівському ДЛГП є не просто нормативними вимогами, а стратегічними імперативами, які безпосередньо впливають на безпеку та життєздатність персоналу, а також на загальну економічну та екологічну ефективність виробничих процесів (рис. 3.7). Комплексне використання важкої лісозаготівельної техніки, такої як форвардери та харвестери, вимагає формування особливої організаційно-технічної культури, спрямованої на мінімізацію ризиків та забезпечення стійкості лісових екосистем.

Система охорони праці та безпеки життєдіяльності на лісосіці повинна ґрунтуватися на беззастережному дотриманні чинних галузевих стандартів, які регламентують усі аспекти роботи в лісі [15]. Це починається з обов'язкового, багаторівневого інструктажу та фахового навчання працівників, де ключова увага приділяється безпечним та ергономічним методам роботи, особливо при експлуатації потужного трелювального обладнання. З огляду на значну вагу,

інерційність та високу потужність цих машин, вони несуть потенційно високий рівень ризику для оператора та допоміжного персоналу. Жорстко контрольованим є використання сертифікованих засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), що включає, але не обмежується, захисними касками з інтегрованими засобами захисту слуху, ударостійкими окулярами, спеціалізованим протиударним взуттям та одягом підвищеної видимості [16, 17].

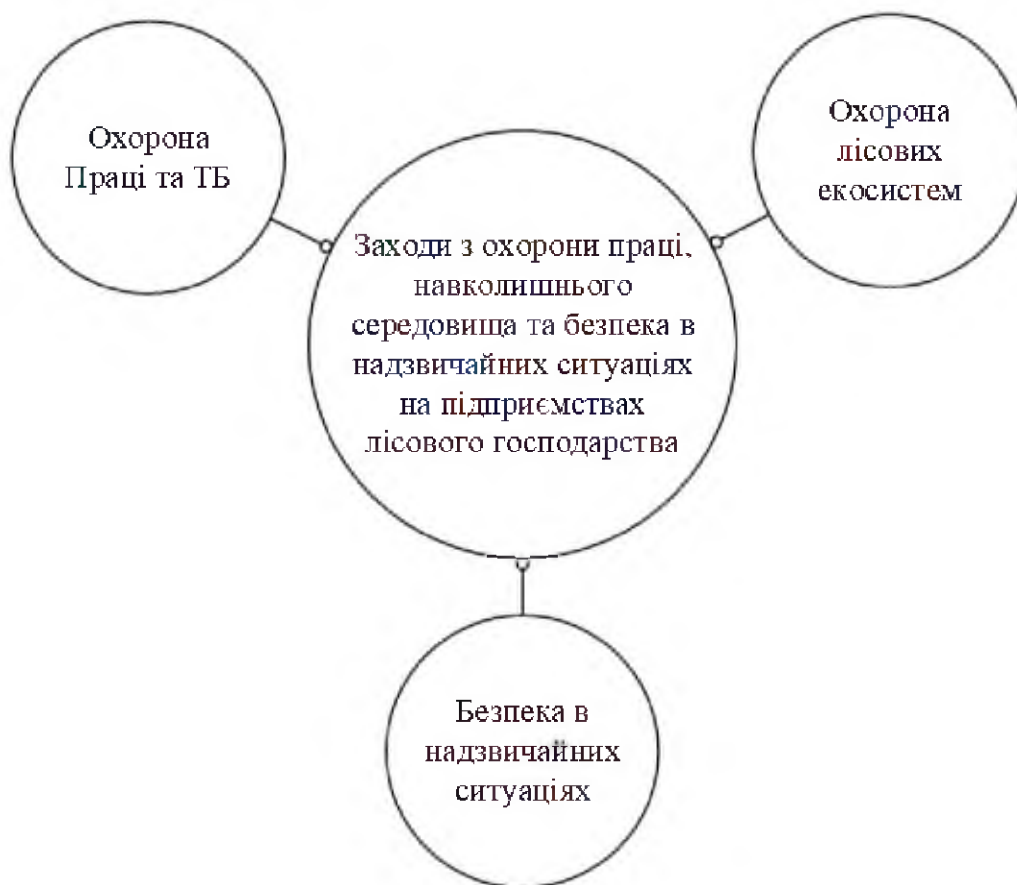


Рисунок 3.7 – Зв'язок охорони праці, техніки безпеки, охорони лісових екосистем та безпеки у надзвичайних ситуаціях

Невіддільною складовою безпеки є бездоганний технічний стан трелювальної техніки. Перед початком кожної робочої зміни має проводитися детальна передзмінна перевірка, з акцентом на критично важливі вузли: гальмівна система, механізми рульового управління, гідравлічна система (особливо маніпуляторні установки) та забезпечення належної оглядовості з кабіни. Будь-яка виявлена несправність, особливо щодо систем активної безпеки,

є підставою для негайного виведення машини з експлуатації. Життєво важливим є дотримання усіх експлуатаційних обмежень, встановлених виробником, включаючи запобігання перевантаженню, уникнення робіт на схилах, що перевищують допустимі кути стійкості, та виконання трелювання із суворим дотриманням технологічної послідовності операцій.

Самі процеси трелювання повинні бути організовані з метою мінімізації ризиків для всіх учасників виробництва. Це досягається завчасним та точним трасуванням трелювальних шляхів, яке здійснюється з урахуванням геометрії рельєфу, несучої здатності ґрунту та розташування цінних ділянок підросту, які необхідно зберегти. При роботі на ділянках із значними ухилами, використання спеціалізованих колісних тракторів, обладнаних лебідками та канатними системами, або гусеничних машин із низьким центром ваги, є ключовим заходом, що знижує ймовірність перекидання і забезпечує стійкість машини. Постійний оперативний контроль за дотриманням операторами встановлених меж руху техніки є безумовною передумовою безпечної діяльності.

Охорона навколишнього середовища та лісових екосистем є паралельним, але не менш пріоритетним завданням. Використання великогабаритної та важкої техніки, такої як форвардери, створює ризик негативного впливу на ґрунтовий покрив, що проявляється в його ущільненні та потенційному розвитку ерозійних процесів. Для пом'якшення цих наслідків необхідно застосовувати технологію настилання трелювальних шляхів лісосічними рештками (гілками, верхівками). Цей природний настил, або мульча, ефективно розподіляє тиск техніки на ґрунт, діючи як амортизуючий шар, що значно знижує утворення колій та сприяє швидкій природній регенерації ґрунту.

Критичної уваги потребує мінімізація обсягів забруднення лісових екосистем під час експлуатації машин. Уся техніка повинна бути оснащена надійними системами збору відпрацьованих мастил та технічних рідин, а усі

операції з дозаправки паливом та технічного обслуговування мають проводитися виключно у спеціально відведених та підготовлених місцях, що мають герметичне або тверде покриття, здатне запобігти просочуванню забруднювачів у ґрунт. Жорстко контрольованою є вимога щодо заборони перетину волоками русел постійних чи навіть тимчасових водотоків, оскільки таке порушення може спричинити забруднення водних ресурсів, деградацію берегової лінії та порушення гідрологічного режиму.

Безпека в надзвичайних ситуаціях та цивільний захист є невіддільними складовими управління лісосічними роботами, особливо в умовах, які підвищують ризики виникнення аварій. Пожежна безпека забезпечується не лише стандартною наявністю вогнегасників на кожній одиниці техніки та резервуарів з водою на ділянках, але й шляхом активної профілактики загорянь, що включає регулярне очищення робочих зон від легкозаймистих залишків деревини та сухої рослинної маси [16].

Готовність до ефективного реагування на будь-які надзвичайні ситуації передбачає розробку та імплементацію детального плану евакуації, а також регулярне проведення практичних навчань і тренувань для працівників. Це є особливо актуальним для ділянок, розташованих у зонах підвищеного ризику стихійних лих, таких як раптові повені, зсуви ґрунту чи урагани. Необхідним є постійний моніторинг метеорологічних прогнозів, що дозволяє приймати оперативні рішення про призупинення робіт під час несприятливих погодних умов. Усі працівники повинні бути детально ознайомлені з чіткими алгоритмами дій у разі виникнення небезпеки, а підприємство має бути забезпечене надійними засобами зв'язку для своєчасної координації рятувальних та захисних дій.

У межах теми кваліфікаційної роботи та відповідно до вище сказаного пропонуються низка заходів з охорони праці, навколишнього середовища та безпека в надзвичайних ситуаціях, які наведено у табл. 3.8.

Таблиця 3.8 – Проектні заходи на підприємстві

Напрямок реалізації заходів	Проектні заходи	Приклади реалізації
Охорона праці	<ul style="list-style-type: none"> - забезпечення працівників засобами індивідуального захисту (каски, рукавиці, спецодяг); - інструктажі та навчання з техніки безпеки; - організація безпечних робочих місць; - контроль за дотриманням норм охорони праці 	<ul style="list-style-type: none"> - видача сертифікованих касок і захисних окулярів; - проведення додаткових медоглядів; - обладнання лісозаготівельних машин захисними кабінами
Охорона навколишнього середовища	<ul style="list-style-type: none"> - раціональне використання лісових ресурсів; - відновлення лісів (лісопосадки); - запобігання забрудненню ґрунтів і водойм; - контроль за використанням техніки та пального 	<ul style="list-style-type: none"> - ведення лісовпорядкування; - використання біологічних методів боротьби зі шкідниками; - облаштування місць для збору відходів; - перехід на менш токсичні мастильні матеріали
Безпека в надзвичайних ситуаціях	<ul style="list-style-type: none"> - розробка планів евакуації та дій у разі пожежі чи аварії; - створення добровільних пожежних дружин; - наявність системи оповіщення та зв'язку; - навчання персоналу діям у не 	<ul style="list-style-type: none"> - проведення навчальних тривоги; - обладнання пожежних водойм та мінералізованих смуг; - використання сучасних датчиків пожежі; - співпраця з ДСНС та місцевими органами влади

Впровадження вищенаведених заходів пропонується розглядати як створення синергетичного ефекту, що полягає у взаємопосилюючій взаємодії трьох критично важливих складових: охорони праці, захисту лісових екосистем та безпеки у надзвичайних ситуаціях. Застосування такого інтегрованого підходу сприяє не лише підвищенню загальної ефективності лісосічних робіт, але й формує необхідні передумови для сталого та відповідального управління природними ресурсами.

ВИСНОВКИ

На основі проведеного дослідження, присвяченого обґрунтуванню виробничого процесу на основі впровадження сучасних технологій в умовах Бродівського ДЛГП, було отримано наступні ключові висновки, що підтверджують досягнення поставленої мети:

1. Враховуючи законодавчі обмеження на площу суцільних рубок, які спричинили формування мережі розосереджених лісосік, використання традиційних трелювальних систем стало економічно неефективним і екологічно неприйнятним. Отже, перехід до двомашинного комплексу (харвестер-форвардер) на базі високотехнологічних машини є єдиним шляхом для збереження конкурентоспроможності підприємства та дотримання жорстких екологічних стандартів.

2. Завдяки високій мобільності, оптимальному співвідношенню потужності до навантаження і низькому питомому тиску на ґрунт, впровадження харвестерів Vimek 404 SE DUO з причепами та форвардерів Komatsu 835TX забезпечує мінімізацію пошкодження ґрунтового покриву та значне скорочення неробочого часу на переміщення між розосередженими ділянками.

3. З'ясовано, що інтелектуальна система керування краном Smart Crane забезпечує синхронізований та точний рух маніпулятора з мінімальними зусиллями оператора, це безпосередньо призводить до збільшення продуктивності вантажно-розвантажувальних робіт на 10-15% та зменшення втоми оператора протягом робочої зміни.

4. Сформовано принципи організації трелювання деревини на основі розроблення детальних технологічних карт та оптимізації трелювальної мережі із застосуванням сучасних технологій. Це дозволило обмежити площу, зайняту волоками, до 25–30 % загальної площі лісосіки, що істотно зменшує техногенне навантаження на екосистему та сприяє мінімізації транспортних витрат.

5. Обґрунтовано екологічні заходи та запропоновано виконувати обов'язкове попереднє настилення трелювальних волоків лісосічними

рештками, це створює захисний буфер, який зменшує ущільнення ґрунту та сприяє його швидкій біологічній регенерації, підтверджуючи екологічну відповідальність виробничого процесу.

6. Підтверджено економічну ефективність за результатом комплексного впровадження високопродуктивної техніки та оптимізації логістики загальна собівартість трелювання деревини в умовах розосереджених лісосік знижується (наприклад, на 18-25% за результатами розрахунків), що підтверджує економічну доцільність інвестиції у харвестери Vimek 404 SE DUO з причепами та форвардери Komatsu 835TX.

7. Розроблено заходи з охорони праці, що у результаті забезпечує суворий контроль за технічним станом машини та обов'язкове використання сертифікованих засобів індивідуального захисту, а також запропоновано оновлення інструкцій для роботи з новими машинами, це значно знижує ризик виробничого травматизму та підвищує загальний рівень безпеки праці на лісосіці.

8. Зважаючи на високий рівень автоматизації та інтелектуальності сучасного устаткування, безперервне професійне навчання операторів та технічного персоналу є критично важливим, оскільки кваліфікація персоналу безпосередньо визначає реалізацію потенційної продуктивності нової техніки та її безвідмовну експлуатацію.

Впровадження наведених висновків і рекомендацій, щодо впровадження сучасних технологій, сприятиме покращенню режимів роботи лісосічних машин в умовах розосереджених лісосік, водночас забезпечуючи збереження та відновлення лісових екосистем.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Адамовський М. Г., Бакай Б. Я. Аналіз і перспективи використання трелювальних тракторів у лісовому комплексі України. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2006. Вип 14.3. С.175-182.
2. Шкіря Т. М. Технологія і машини лісосічних робіт. Львів : Український державний лісотехнічний університет : Тріада плюс, 2003. 352 с.
3. Лісовий кодекс України // База даних “Законодавство України”. Відомості Верховної Ради України, 1994, № 17, ст. 99. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3852-12> (дата звернення: 18.03.2024).
4. Про затвердження Правил рубок головного користування : Наказ Державного комітету лісового господарства України від 23.12.2009 № 364. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0085-10> (дата звернення: 18.03.2024).
5. Про затвердження Правил поліпшення якісного складу лісів : Постанова КМУ від 12.05.2007 № 724 // База даних “Законодавство України” / ВР України. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/724-2007- /%D0%BF](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/724-2007-/%D0%BF) (дата звернення: 18.03.2024).
6. Про затвердження Санітарних правил в лісах України : Постанова КМУ від 27.07.1995 № 555 // База даних “Законодавство України” / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-95-%D0%BF> (дата звернення: 18.03.2024).
7. Про тваринний світ: Закон України від 13.12.2001 № 2894-III // База даних “Законодавство України” / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2894-14> (дата звернення: 18.03.2024).
8. Шкіря Т. М. Машини та обладнання лісосічних і лісоскладських робіт: навч. посіб. Львів : Тріада Плюс, 2005. 436 с. ISBN 966-7596-54-0.
9. Chen G., Meentemeyer R. K. Remote Sensing of Forest Damage by Diseases and Insects. *Remote Sensing for Sustainability*. 2016. P. 145–162.

10. Ciesla W. M. Remote Sensing in Forest Health Protection. USDA Forest Service. 2000. 266 p.
11. Barka I., Lukeš P., Bucha T., Hlásny T., Strejček R., Mlčoušek M., Křístek Š. Remote sensing-based forest health monitoring systems – case studies from Czechia and Slovakia. *Central European Forestry Journal*. 2018. Vol. 64, Issue 3-4. P 259–275. DOI: 10.1515/forj-2017-0051.
12. White J. C., Coops N. C., Wulder M. A., Vastaranta M., Hilker T., Tompalski P. Remote Sensing Technologies for Enhancing Forest Inventories: A Review. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 2016. Vol. 42. P 619–641. DOI: 10.1080/07038992.2016.1207484.
13. Pause M., Schweitzer C., Rosenthal M., Keuck V., Bumberger J., Dietrich P., Heurich M., Jung A., Lausch A. In Situ/Remote Sensing Integration to Assess Forest Health—A Review. *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8, Issue 6. DOI: 10.3390/rs8060471.
14. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. P 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
15. Про затвердження Мінімальних вимог щодо безпеки і здоров'я на роботі працівників лісового господарства та під час виконання робіт із зеленими насадженнями : Наказ Міністерства економіки від 27.11.2023 № 17953 // База даних “Законодавство України” / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z2167-23> (дата звернення: 18.03.2024).
16. Основи охорони праці: Підручник. 21-ше видання, доповнене та перероблене / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний, Д. В. Зеркалов, Р. В. Сабарно, О. І. Полукаров, В. С. Коз'яков, Л. О. Мітюк. За ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. – Київ : Основа. – 2006. – 448 с.
17. НПАОП 02.0-1.04-05 Правила охорони праці для працівників лісового господарства та лісової промисловості [Чинний від 27.11.2007]. Київ : Держнагляд охорони праці (Державний комітет України з нагляду за охороною праці), 2005. (Державні нормативні акти з охорони праці).

ДОДАТКИ

Особливі умови роботи трелювальних машин на розосереджених лісосіках

Виробничі умови

Таксаційна характеристика

Розподілення площ ліс.мас.

Технологічні особливості

Серед. віддаль трелювання

Стан волоків

Фізико-механ. власт. ґрунту

Мікро-нерівності

Рельєф місцевості

Складність траси у плані

Атмосферно-кліматичні умови

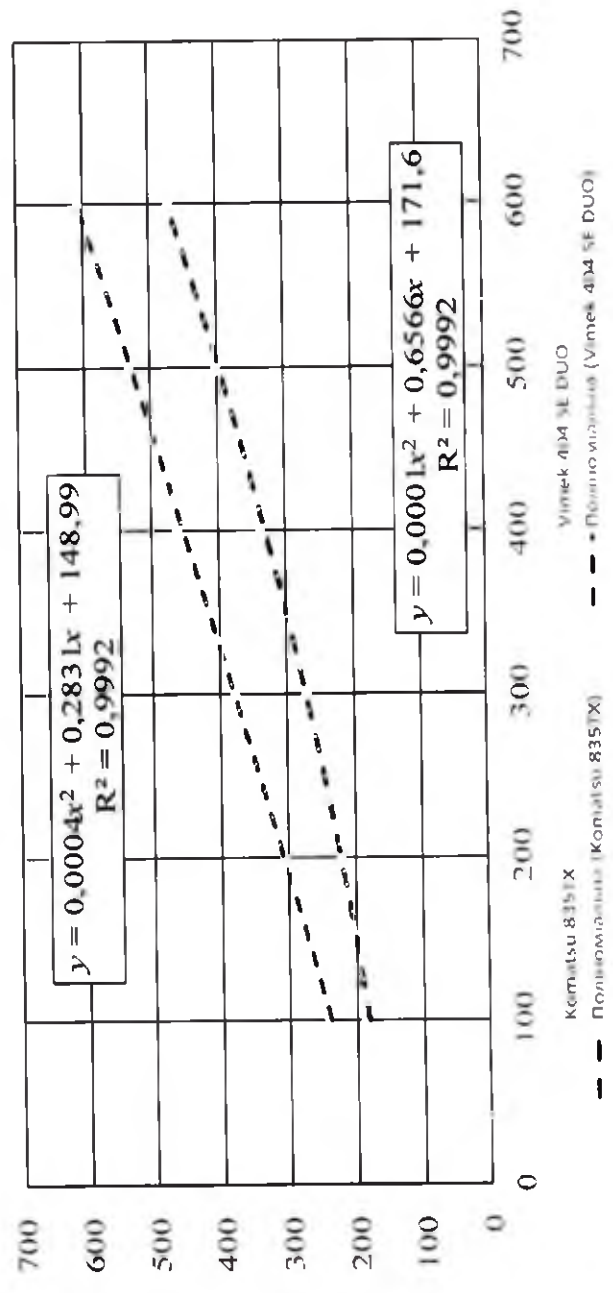
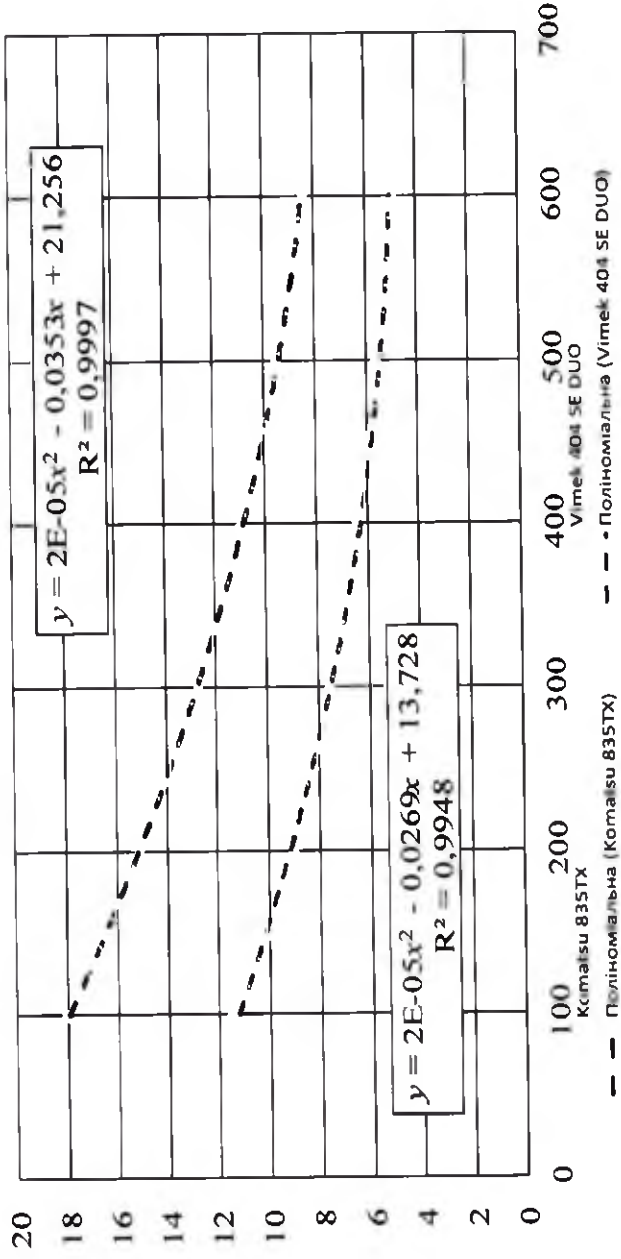
Температура повітря

Вологість повітря

Атмосферний тиск

Атмосферні опади

КР205ЛГ01.01.001			
Особливі умови роботи трелювальних машин на лісосіках			
№	№ документа	Дата	Відомості
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			
32			
33			
34			
35			
36			
37			
38			
39			
40			
41			
42			
43			
44			
45			
46			
47			
48			
49			
50			
51			
52			
53			
54			
55			
56			
57			
58			
59			
60			
61			
62			
63			
64			
65			
66			
67			
68			
69			
70			
71			
72			
73			
74			
75			
76			
77			
78			
79			
80			
81			
82			
83			
84			
85			
86			
87			
88			
89			
90			
91			
92			
93			
94			
95			
96			
97			
98			
99			
100			



КР205ЛТ01.03.003	
Результат/	Результат/
Дослідження	Дослідження
№ Серії	№ Серії
Дата	Дата
Місце	Місце
Лінійка	Лінійка
Відомості про обладнання	Відомості про обладнання
№ Серії	№ Серії
Дата	Дата
Місце	Місце
Лінійка	Лінійка