УДК 630*3:629.3 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.4.1.7

Ю. І. БЛЯШИНЕЦЬ
аспірант кафедри лісових машин та автомобільного транспорту
Національний лісотехнічний університет України
ORCID: 0009-0008-4865-7163

ОЦІНЮВАННЯ СТІЙКОСТІ ЛІСОВОЗНОГО АВТОМОБІЛЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ПОРТАТИВНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

Актуальність дослідження зумовлена високим ризиком перекидання лісовозних автомобілів, що експлуатуються в Україні. Цей ризик значно посилюється специфічними факторами: конструктивно високим центром мас, встановленням важкого маніпуляторного обладнання, динамічним характером вантажу (деревина) та експлуатацією на лісових дорогах зі складним рельєфом. Переважна частина автопарку складається із застарілих моделей (наприклад, УРАЛ-4320), не обладнаних сучасними системами контролю стійкості, а їхня модернізація є економічно недоцільною. Проблема полягає у відсутності доступних, портативних дорадчих систем для моніторингу безпеки та збору даних для аналізу ризиків.

Метою дослідження є розробка, прототипування та емпірична валідація портативного, бюджетного пристрою для моніторингу кута поперечного нахилу лісовозного автомобіля в реальному часі з функціями сповіщення водія та геопросторової реєстрації даних.

Методологія дослідження включає проєктування апаратно-програмного комплексу на базі мікроконтролера ESP32, інерціального вимірювального блоку MPU-6050 та GPS-модуля NEO-6M. Проведено польові випробування розробленого пристрою, встановленого на лісовозний автомобіль УРАЛ-4320 з маніпулятором Palfinger PK 15500A.

Виконано порівняльний аналіз двох сценаріїв руху тестовим маршрутом: без навантаження та з повним завантаженням деревиною.

Наукова новизна полягає в обґрунтуванні та емпіричній перевірці подвійної функціональності портативної системи: 1) як дорадчої системи безпеки для водія; 2) як інструменту збору об'єктивних емпіричних даних (координати, швидкість, кут нахилу) для картографування небезпечних ділянок лісових доріг з метою проактивного управління інфраструктурними ризиками.

Практична цінність роботи полягає у створенні доступного технічного рішення для модернізації застарілого парку лісовозної техніки, що прямо сприяє підвищенню безпеки праці в лісозаготівельній галузі.

Ключові слова: *стійкість транспортних засобів, лісовозний автомобіль, портативний моніторинг, безпека лісозаготівель, картографування ризиків.*

YU. I. BLIASHYNETS
Postgraduate Student at the Department of Forest Machines
and Automobile Transport
Ukrainian National Forestry University
ORCID: 0009-0008-4865-7163

EVALUATION OF LOGGING TRUCK STABILITY USING A PORTABLE MEASURING DEVICE

The relevance of this research is driven by the high rollover risk associated with logging trucks operated in Ukraine. This risk is significantly amplified by specific factors: a structurally high center of mass, the installation of heavy manipulator equipment (e.g., Palfinger PK 15500A), the dynamic nature of the cargo (timber), and operation on complex-terrain forest roads. The predominant part of the vehicle fleet consists of outdated models (e.g., URAL-4320) that are not equipped with modern Electronic Stability Control (ESC/RSC) systems, and their retrofitting is economically unfeasible. The problem lies in the absence of affordable, portable advisory systems for safety monitoring and data collection for infrastructure risk analysis.

The objective of this work is to design, prototype, and empirically validate a portable, low-cost device for real-time monitoring of a logging truck's lateral tilt angle, featuring driver warning functions and geospatial data logging.

The research methodology includes the design of a hardware-software complex based on an ESP32 microcontroller, an MPU-6050 Inertial Measurement Unit (IMU), and a NEO-6M GPS module. Field tests of the developed device were conducted on a URAL-4320 logging truck equipped with a Palfinger PK 15500A manipulator. A comparative analysis of two scenarios was performed along a test route: driving without a load and with a full timber load.

© Ю. І. Бляшинець, 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

The scientific novelty lies in the substantiation and empirical verification of the portable system's dual functionality: 1) as an advisory safety system for the driver; 2) as a tool for collecting objective empirical data (coordinates, speed, tilt angle) for mapping hazardous sections of forest roads, enabling proactive infrastructure risk management.

The practical value of the work consists in creating an affordable technical solution for modernizing the outdated fleet of logging vehicles, which directly contributes to improving occupational safety in the logging industry.

Key words: *vehicle stability, logging truck, portable monitoring, forestry safety, risk mapping.*

Постановка проблеми

Лісотранспортні операції незмінно пов'язані з підвищеним рівнем ризику, де однією з найкритичніших загроз є втрата поперечної стійкості та подальше перекидання лісовозного автомобіля. На відміну від магістральних вантажних перевезень, лісовозний транспорт характеризується унікальною сукупністю факторів, що експоненційно підвищують імовірність аварії.

Однією з ключових причин зниження стійкості лісовозних автомобілів є конструктивно високе розташування центру мас. Важливу роль відіграють і умови експлуатації – здебільшого це неасфальтовані лісові дороги зі складним поздовжнім і поперечним профілем, ухилами, вибоїнами та поворотами з недостатнім або навіть зворотним поперечним нахилом.

Значна частина автопарку, задіяного в лісозаготівлі в Україні, складається з моделей, розроблених десятиліття тому, які конструктивно не оснащені сучасними інтегрованими системами контролю стійкості. Висока вартість та технічна складність інтеграції таких систем у застарілі конструкції робить дооснащення недоцільним.

Як наслідок, утворюється критичний розрив у забезпеченні безпеки: водії найбільш уразливих транспортних засобів залишаються без будь-яких інструментів для об'єктивної оцінки ризику в реальному часі. Таким чином, проблема полягає у відсутності доступного, портативного та ефективного дорадчого пристрою, здатного надавати водієві миттєвий зворотний зв'язок щодо поточної стійкості та одночасно реєструвати геопросторові дані про небезпечні ділянки для подальшого аналізу дорожньої інфраструктури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні рішення для контролю стійкості важких транспортних засобів можна умовно поділити на дві категорії: активні та пасивні (дорадчі) системи.

Активні системи є стандартом для нових комерційних автомобілів. Вони інтегровані в бортові системи автомобіля і здатні активно втручатися в керування −пригальмовувати окремі колеса або знижувати потужність двигуна для запобігання заносу чи перекиданню [1, 4]. Наукова література детально описує складні алгоритми та моделі, що лежать в основі цих систем, проте вони залишаються непридатними для модернізації застарілого автопарку через технічну складність та високу вартість.

Пасивні, або дорадчі, системи не втручаються в керування, а виконують функцію моніторингу та інформування.

Систематичний аналіз існуючих технологій ідентифікує чітку незаповнену нішу. Наукова література детально описує складні, активні та інтегровані системи [2, 5]. Водночас практично відсутні дослідження, присвячені розробці бюджетних, портативних та автономних дорадчих систем, спеціально адаптованих для умов експлуатації лісовозного транспорту. Існуючі рішення спрямовані на запобігання перекиданню через автоматичне втручання. Натомість дане дослідження фокусується на альтернативному підході: запобіганні аваріям через підвищення ситуаційної обізнаності водія та збір даних для аналізу ризиків.

Пропонований пристрій заповнює цей технологічний та економічний розрив, пропонуючи рішення для сегмента, який наразі залишається поза увагою розробників передових систем безпеки.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є проєктування, створення прототипу та емпірична валідація портативного, бюджетного пристрою для моніторингу та реєстрації кута поперечного нахилу лісовозного автомобіля в реальному часі.

Викладення основного матеріалу дослідження

Вибір апаратної бази для прототипу ґрунтувався на ключових вимогах проєкту: низька вартість, доступність компонентів, енергоефективність, портативність та можливість швидкого прототипування. Було обрано централізовану архітектуру, де мікроконтролер координує роботу всіх сенсорів та периферійних пристроїв. Специфікація апаратних компонентів пристрою наведена в таблиці 1, а архітектура пристрою −на рисунку 1.

Функціонування пристрою реалізовано у вигляді безперервного циклу. При увімкненні живлення система ініціалізує всі апаратні модулі. На початковому етапі водій через сенсорний екран може вводити вихідні параметри (наприклад, статус завантаження), на основі яких система встановлює порогові значення для попереджувальної ("жовта зона") та аварійної ("червона зона") сигналізації.

В основному циклі мікроконтролер з високою частотою опитує сенсор MPU-6050.

Таблиця 1

Основні характеристики компонентів присторою для вимірювання кута нахилу

Компонент	Модель	Функція в системі	Обґрунтування вибору
1.Мікроконтролер	ESP32-WROOM-32	Центральна обробка, злиття даних сенсорів, керування інтерфейсом користувача, контроль запису даних	Низька вартість, висока продуктивність, вбудовані модулі Wi-Fi/Bluetooth
2.IMU-сенсор	MPU-6050	3-осьовий акселерометр та 3-осьовий гіроскоп	Перевірене бюджетне рішення для відстеження руху, достатня точність
3.GPS-модуль	NEO-6M	Надання даних про широту, довготу, висоту, швидкість та точні часові мітки для точок даних	Стандартний, надійний модуль для геоприв'язки даних
4.Зберігання даних	Модуль карти MicroSD	Реєстрація даних в універсальному форматі CSV	Просте, надійне рішення
5.Дисплей	2.8" TFT LCD	Відображення інформації для водія	Забезпечує негайний, інтуїтивно зрозумілий зворотний зв'язок для водія
6.Система оповіщення	Активний динамік	Випромінювання звукового сигналу тривоги	Надає додаткове попередження, яке неможливо пропустити
7.Джерело живлення	УМБ ХО PR124 40000 mAh	Забезпечення безперервного живлення пристрою	Необхідна ємність та низька вартість
8.Візуалізація даних	kepler.gl	Візуалізація даних, зібраних пристроєм	Зручність та безкоштовний доступ

Для визначення нахилу використано дані акселерометра (лінійні прискорення по осях a_x, a_z). Значення переводяться у відносні одиниці:

$$a_x^f = \frac{a_x}{16384},\ a_z^f = \frac{a_z}{16384}, \tag{1.1}$$

де 16384 – коефіцієнт нормалізації для 16-бітного виходу давача.

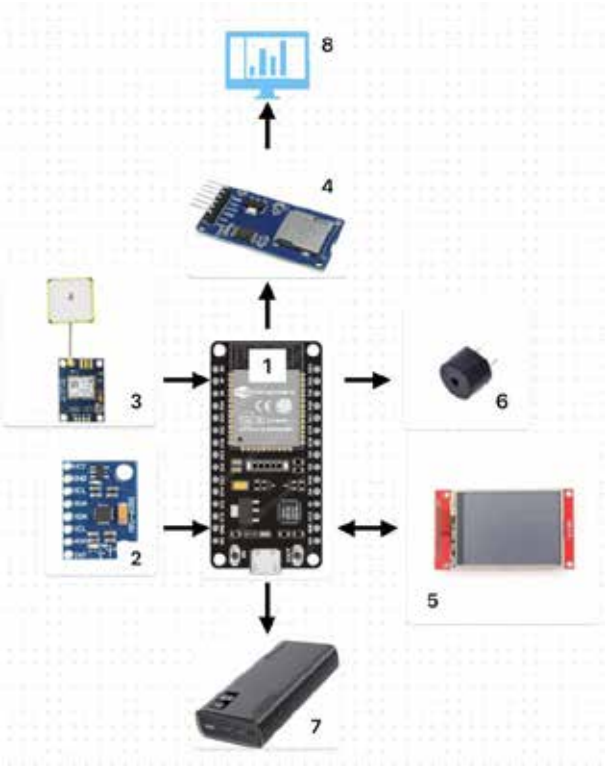

Рис. 1. Архітектура пристрою

Кут нахилу визначається як

$$\varphi = \left|\arctan\left(\frac{a_x^f}{a_z^f}\right)\right| \cdot \frac{180}{\pi}, \tag{1.2}$$

що дозволяє отримати абсолютне значення відхилення у градусах.

Для визначення критичного кута перекидання використано наступну формулу [3]:

$$\tan\beta_{крп} = \frac{2v^2h - gB_0R}{2ghR + B_0v^2}, \quad (1.3)$$

де h – висота центру маси, м; v – швидкість руху автомобіля, км/год; g – прискорення вільного падіння; R – радіус повороту, м; B_0 – колія автомобіля, м.

Обчислений кут нахилу безперервно порівнюється із заданими порогами та виводиться на дисплей з кольоровою індикацією. При перевищенні порогу червоної зони система одночасно активує візуальне повідомлення на екрані та вмикає звуковий сигнал. Паралельно система формує запис, що містить часову мітку, географічні координати, висоту, швидкість та кут нахилу, і зберігає його на карту MicroSD.

Агрегація даних з кількох поїздок або від усього автопарку дозволяє виявити системні проблеми в дорожній інфраструктурі. Наприклад, якщо на певній ділянці лісової дороги постійно фіксуються небезпечні нахили у різних автомобілів, це є об'єктивним свідченням дефекту самої дороги (неправильний профіль, недостатній поперечний ухил). Такі емпіричні дані можуть слугувати вагомим аргументом для обґрунтування витрат на ремонт чи реконструкцію дороги, введення локальних обмежень швидкості або зміни маршрутів руху. Таким чином, відбувається перехід від реактивного реагування на небезпеку (попередження водія) до проактивного усунення її першопричин, що є значно ефективнішою стратегією підвищення безпеки в довгостроковій перспективі.

Для емпіричної валідації розробленого пристрою та підтвердження його практичної придатності було проведено серію польових випробувань в реальних умовах експлуатації в Бібрському лісництві Львівського надлісництва Філії “Карпатський лісовий офіс” ДП «Ліси України».

Об'єктом дослідження був лісовозний автомобіль УРАЛ-4320. Автомобіль додатково оснащений гідравлічним маніпулятором Palfinger PK 15500A. Розроблений портативний пристрій було закріплено в кабіні автомобіля (рис. 2).

Рис. 2. Лісовозний автомобіль УРАЛ-4320 та пристрій закріплений в його кабіні

Тестовий маршрут проходив по лісовій дорозі зі складним гірським рельєфом, що характеризується значними поперечними та поздовжніми ухилами, вибоїнами та коліями (рис. 3).

Було досліджено два граничні сценарії експлуатації для порівняльного аналізу – рух автомобіля без вантажу та навантаженим деревиною по тестовому маршруту.

Польові випробування згенерували два масиви геопросторових даних, що стали основою для емпіричної валідації пристрою. Для об'єктивної оцінки впливу навантаження на стійкість автомобіля було проведено порівняльний статистичний аналіз ключових параметрів (таблиця 2).

Аналіз емпіричних даних свідчить про суттєвий вплив навантаження на динамічні параметри та стійкість лісовозного автомобіля. Як видно з таблиці 2, у завантаженому стані максимальна швидкість зменшується з 18.50 до 16.41 км/год, а середня – з 8.39 до 6.25 км/год. Це зниження пов’язане зі збільшенням маси системи, що зумовлює вищі інерційні сили та потребує обережнішого режиму руху. Водночас спостерігається збільшення середнього

кута нахилу з 4.39° до 5.54° та максимального – з 15.8° до 17.8°, що вказує на підвищення впливу навантаження на положення центру мас і поведінку шасі під час руху по нерівній поверхні. Виявлена залежність демонструє, що зі зростанням маси транспортного засобу збільшується амплітуда коливань корпусу та кутів нахилу, тоді як швидкісні параметри знижуються. Отже, результати польових випробувань підтверджують, що завантаження автомобіля є визначальним фактором, який безпосередньо впливає на його динамічну стійкість та безпеку руху.

Рис. 3. Ділянки маршруту вивезення деревини в Бібрському лісництві

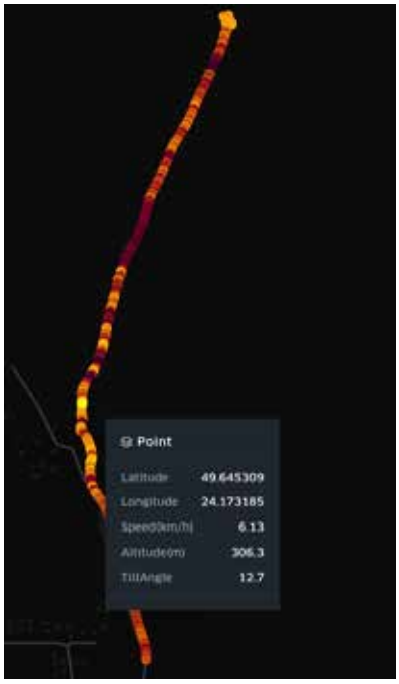

Рис. 4. Візуалізація даних маршруту вивезення деревини в Бібрському лісництві з пристрою за допомогою сервісу kepler.gl

Обґрунтування наукової цінності та практичної придатності даних – отримані під час польових випробувань дані мають як наукову, так і практичну цінність. Вони підтвердили працездатність розробленого апаратно-програмного комплексу в реальних умовах експлуатації – за наявності вібрацій, перепадів напруги та складного рельєфу, забезпечуючи точну реєстрацію ключових параметрів руху.

Таблиця 2

Порівняльна статистична характеристика параметрів руху за результатами польових випробувань

Параметр	Сценарій 1: порожній	Сценарій 2: завантажений
Кількість записів значень за один маршрут	704	788
Максимальна швидкість, км/год	18.50	16.41
Середня швидкість, км/год	8.39	6.25
Середній кут нахилу, градуси	4.39	5.54
Максимальний кут нахилу	15.8	17.8

Висновки

Дослідження підтвердило технічну можливість і практичну цінність створення недорогого пристрою для моніторингу стійкості лісовозних автомобілів. Основний науковий та практичний внесок роботи полягає в інтеграції існуючих технологій у нове прикладне рішення, що заповнює критичну нішу в забезпеченні безпеки застарілого парку лісовозної техніки.

Ключовою перевагою запропонованої системи є її подвійна функціональність. З одного боку, вона слугує як дорадча система для водія, надаючи миттєві попередження про небезпечний нахил, що дозволяє вчасно скоригувати швидкість або траєкторію руху. З іншого боку, функція геопросторової реєстрації даних перетворює пристрій на інструмент для системного аналізу ризиків, дозволяючи виявляти та картографувати небезпечні ділянки дорожньої мережі для подальшого впровадження превентивних заходів.

Розроблений пристрій успішно протестовано на лісовозі УРАЛ-4320 з маніпулятором Palfinger PK 15500A, що засвідчило його надійність і точність вимірювань.

Подальші дослідження зосереджено на вдосконаленні алгоритмів і розширенні випробувань для різних моделей лісотранспортних машин.

Список використаної літератури

1. Yue, Z., Jiangming, K., & Fenglu, L. (2017). A research of design, lateral stability and simulation for a chassis running in forest. *Croatian Journal of Forest Engineering*. Vol. 43 (2), 18–29.
2. Wang, J. S. (2011). *Effectiveness Estimation for Electronic Stability Control (ESC) and Roll Stability Control (RSC) Systems for Heavy Trucks*. (Report No. DOT HS 811 433). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.
3. Библюк Н.І. *Лісотранспортні засоби: теорія.* – Львів: "Панорама", 2004. – 253 с.
4. Palkovics, L., et al. (1998). *Roll-Over Prevention System for Commercial Vehicles*. SAE Technical Paper 982782.
5. Petersen, E., et al. (1998). *Vehicle Stability Control for Trucks and Buses*. SAE Technical Paper 982782.

References

1. Yue, Z., Jiangming, K., & Fenglu, L. (2017). A research of design, lateral stability and simulation for a chassis running in forest. *Croatian Journal of Forest Engineering*. Vol. 43 (2), 18–29.
2. Wang, J. S. (2011). *Effectiveness Estimation for Electronic Stability Control (ESC) and Roll Stability Control (RSC) Systems for Heavy Trucks*. (Report No. DOT HS 811 433). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.
3. Bybliuk, N.I. (2004). *Lisotransportni zasoby: teoriia [Forest transport vehicles: theory]*. Lviv: Panorama [in Ukrainian].
4. Palkovics, L., et al. (1998). *Roll-Over Prevention System for Commercial Vehicles*. SAE Technical Paper 982782.
5. Petersen, E., et al. (1998). *Vehicle Stability Control for Trucks and Buses*. SAE Technical Paper 982782.

Дата першого надходження рукопису до видання: 14.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 11.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025