

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет інженерії та енергетики**

**Кафедра машиновикористання та сервісу технологічних систем**

**Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису**

**Бондарчук Максим Олександрович**

**УДК 519.685**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**Обґрунтування доцільності застосування датчиків  
«LIDAR» для автоматизації мобільних  
сільськогосподарських машин**

**208 “Агроінженерія”**

**Подається на здобуття освітнього ступеня магістр**

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело \_\_\_\_\_ М.О. Бондарчук

**Керівник роботи**

**Білецький В.Р.**

**к.т.н., доцент**

**Житомир – 2020**

## АНОТАЦІЯ

**Бондарчук Максим Олександрович. Обґрунтування доцільності застосування датчиків «LiDAR» для автоматизації мобільних сільськогосподарських машин. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.**

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

В магістерській роботі розроблена система безпеки автоматизованих мобільних сільськогосподарських машин на основі використання датчиків «LiDAR» для автоматизації. Розроблена загальна система безпеки, яка може використовуватися в будь-якому багатоагентному парку машин, була інтегрована в кожен машину і складалася з декількох ієрархічно взаємопов'язаних підсистем: детектор перешкод; контролер машини та менеджер місії. Поєднання цих підсистем дозволило виявити перешкоди на індивідуальному рівні, а також запобігти можливим зіткненням машин на рівні парку.

Результати, отримані під час експлуатаційних випробувань, продемонстрували потенціал використання LiDAR, як датчика безпеки, здатного виявити 100% перешкод.

Датчик LiDAR продемонстрував свою надійність при використанні в якості запобіжного пристрою, оскільки він здатен підлаштовуватися під можливі перешкоди для кожного технологічного процесу (пил, дощ, вібрація та нахил місцевості), а також здатен визначати розміри захисного поля (залежно від швидкості машини, гальмівної здатності та конструкції самого запобіжного контуру).

*Ключові слова: автоматизація, безпека, датчик LiDAR, мобільна машина, система*

## ANNOTATION

**Bondarchuk Maxim Alexandrovich. Substantiation of expediency of application of LIDAR sensors for automation of mobile agricultural machines. – Qualification work on the rights of the manuscript.**

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 - Agricultural Engineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2020.

In the master's thesis the safety system of automated mobile agricultural machines based on the use of "LIDAR" sensors for automation is developed. The developed general security system, which can be used in any multi-agent fleet of machines, was integrated into each machine and consisted of several hierarchically interconnected subsystems: interference detector; machine controller and mission manager. The combination of these subsystems allowed to detect obstacles at the individual level, as well as to prevent possible collisions of cars at the park level.

The results obtained during operational tests demonstrated the potential of using LiDAR as a safety sensor capable of detecting 100% interference.

The LiDAR sensor has demonstrated its reliability when used as a safety device, as it is able to adapt to possible obstacles for each process (dust, rain, vibration and slope), and is able to determine the size of the protective field (depending on machine speed, braking power and design of the safety circuit).

*Keywords: automation, security, LiDAR sensor, mobile machine, system.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ «LIDAR» У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ.....	7
РОЗДІЛ 2. ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	13
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	21
ВИСНОВКИ.....	27
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	28

## ВСТУП

Датчик LiDAR – це безконтактний оптичний пристрій, який вимірює відстань до об'єкта в полі сканування за допомогою техніки TOF. Він має високий діапазон експлуатації, завдяки чому може проводити точні вимірювання у несприятливих умовах навколишнього середовища, таких як туман, пил або дим [1-4].

Таким чином LiDAR це надійний датчик, який можна використовувати для різних потреб сільського господарства. В останній час все більшої популярності набуває автоматизації сільськогосподарських операцій, а тому дослідження можливості використання датчиків LiDAR для автоматизації мобільних сільськогосподарських машин є беззаперечно актуальною задачею.

**Мета і задачі дослідження.** Мета дослідження підвищити рівень автоматизації технологічних процесів за рахунок використання датчиків LiDAR для розробки системи безпечної експлуатації мобільних сільськогосподарських машин.

Відповідно до поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати стан питання по застосуванню систем «LiDAR» у сільському господарстві;
- розробити обладнання для автоматизації мобільних сільськогосподарських машин та методикау їх дослідження;
- провести експлуатаційні дослідження.

**Об'єкт дослідження:** автоматизований процес виконання технологічної операції роботизованими мобільними сільськогосподарськими машинами.

**Предмет дослідження:** закономірності виявлення перешкод автоматизованими мобільними сільськогосподарськими машинами в залежності від характеристики датчиків та умовами і режимами експлуатації.

**Методи дослідження.** Дослідження виконано з використанням методів прикладної фізики, землеробської механіки та оптики. Обробку

експериментальних даних виконували за допомогою методів математичної статистики та теорії ймовірності.

### **Перелік публікацій за темою роботи:**

1. **Бондарчук М. О.** Застосування систем «LiDAR» у сільському господарстві. Збірник матеріалів і Всеукраїнської студентської науково-практичної конференції «*Теорія і практика сучасної науки очима молоді*» 26 березня 2020 року (проведено он-лайн 30 квітня 2020 року) м. Харків : ХНТУСГ ім. П. Василенка. С. 72-73.

2. **Бондарчук М. О.** До питання використання датчиків LiDAR при визначенні параметрів урожаю кормових культур. IX Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (05-24 жовтня 2020 р.). [Електроний ресурс] – <http://animal-conf.inf.ua/conf.html>.

3. Білецький В. Р., **Бондарчук М. О.** Датчики LiDAR у сільському господарстві. Матеріали XXI Міжнародної наукової конференції „*Сучасні проблеми землеробської механіки*” присвяченої 90-річчю Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка та 120-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка. 17 – 18 жовтня 2020 року Харків : ХНТУСГ ім. П. Василенка. С. 30-32.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати роботи можуть бути впроваджені при розробці автоматизованих систем керування мобільними сільськогосподарськими машинами.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 18 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 30 сторінок комп'ютерного тексту, містить 1 таблицю і 16 рисунків.

## РОЗДІЛ 1

### ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ «LiDAR» У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

Використовуючи оптичне дистанційне зондування, можна оптимізувати використання сучасних систем збирання та сприяти вибору більш економічно ефективних збиральних машин. При виборі оптичного датчика для використання в сільськогосподарських умовах слід враховувати п'ять критеріїв: стійкість до навколишнього середовища та пилу, стійкість до різних умов освітлення, достатній діапазон вимірювання, короткий час відгуку та вартість. Якщо взяти до уваги всі п'ять критеріїв, LiDAR виявляється найбільш перспективною оптичною сенсорною технологією для вимірювання щільності врожаю [1-4].

Існує велика різноманітність систем LiDAR, в залежності від того, де вони встановлені. Можна знайти декілька типів: космічні системи LiDAR для виявлення широких полос зі супутників, повітряні системи LiDAR для виявлення областей середньої дальності з літальних апаратів (500...1000 м) та вертольотів (200...300 м). Це дуже затратні технології (> 500 000 €), що використовуються в основному для картографування; вимірювання топографії земель; узгодження лісових доріг; оцінки рослинного покриву; вимірювання глибини морів і океанів; вимірювання відстаней від точок на землі до супутників; а також у військових додатках для систем розпізнавання цілей.

Хоча більшість цих вимірювань проводилися за допомогою датчиків LiDAR, встановлених на літаках або супутниках, вимірювання також можуть базуватися на наземних системах. Наземні системи LiDAR (HCL), наприклад, підходять для формування моделей оточуючого середовища, моделювання міст чи архітектурних систем, для мобільних систем дорожнього картографування та для визначення параметрів інвентаризації лісу. Будинки, поверхня ландшафтів, а також дерева мають зазвичай великі розміри і демонструють

незначні зміни протягом тривалих періодів, але сільськогосподарські культури мають високу динаміку росту та короткий життєвий цикл, тому з метою управління виробництвом сільськогосподарських культур, поточна інформація потрібна – іноді протягом хвилини або секунди. Саме тому багато сільськогосподарські машини повинні обладнані власними датчиками для виконання операцій у режимі реального часу, оскільки у такому режимі неприйнятне використання повітряних систем LiDAR для сільськогосподарських цілей [5].

Сільськогосподарське виробництво в наш час прагне до більшої точності та автоматизації виконуваних операцій, зі зменшенням впливу на навколишнє середовище. Впровадження точного землеробства (ТЗ) – одна з перших десяти революцій у сільському господарстві, хоча воно комерційно практикується лише з 1990-х. В основному ТЗ передбачає краще управління сільськогосподарськими матеріалами, такими як добрива, гербіциди, насіння, паливо. Великі сільськогосподарські поля в умовах звичайного управління отримують рівномірне застосування добрив, зрошення, насіння тощо, при цьому ТЗ ці поля розділяє на зони управління, кожна з яких отримує індивідуальні дози витратних матеріалів. ТЗ пропонує покращити продуктивність сільськогосподарських культур та рентабельність сільськогосподарських підприємств за рахунок поліпшення управління внесення витратних матеріалів, що призводить до покращення якості навколишнього середовища шляхом інтеграції інформації, зібраної різними типами датчиків та джерел [6-13].

Одне з найпопулярніших сільськогосподарських застосувань HCL – це допоміжний пристрій для навігації / автоматичного ведення, що збільшує продуктивність машини за рахунок зменшення навантаження для водія. Це призначення частково пояснюється тим, що LiDAR має відносно більший діапазон і більш високу роздільну здатність ніж інші датчики, такі як «machine vision», GPS та «dead-reckoning». Крім того, це нечутлива система до умов



навколишнього середовища. Наприклад сильна зміна світла для «machine vision» та наявність мікрохвильових сигналів для GPS впливатимуть на такі системи на відміну від систем LiDAR. Саме тому впровадження систем LiDAR в сільському господарстві є досить перспективними.

Аналіз літературних джерел демонструє експоненціальне зростання використання в сільськогосподарському господарстві датчиків LiDAR (рис. 1.1) [4-10].

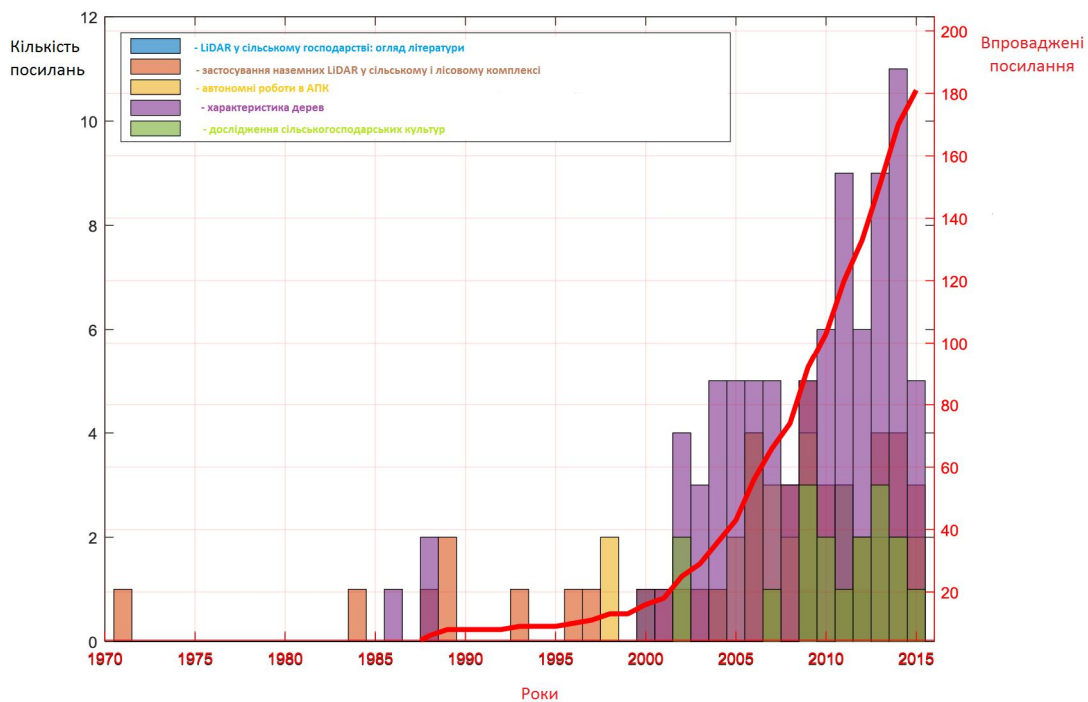


Рис. 1.1. Публікації по темі та впровадження датчиків LiDAR у сільському господарстві

Як бачимо з аналізу публікацій (рис. 1.1) впровадження датчиків лідар в сільському господарстві не набули широкого розповсюдження.

LiDAR (Light Detection And Range), який також називають лазерним радаром, лазерним сканером або лазерним далекоміром, це безконтактний оптичний пристрій, що вимірює відстань до об'єкта в полі сканування за допомогою імпульсного лазерного променя. Датчики LiDAR, які зараз доступні на ринку, використовують різні принципи вимірювання: час прольоту світла, фазову модуляцію, інтерферометрію та триангуляцію. У багатьох випадках перші три принципи об'єднуються в техніку, відому як вимірювання часу

прольоту (TOF). Датчики триангуляції вимірюють короткі відстані (максимум кілька метрів) з високою точністю, тоді як датчики TOF підходять як для коротких, так і для далеких відстаней [11-15].

LiDAR від інших джерел світла відрізняє те, що лазерний промінь має одну довжину хвилі, унікальну фазу та високу щільність енергії. Таким чином, лазерний промінь може розповсюджуватися на досить велику відстань по прямій, підтримуючи вузький промінь і забезпечуючи стабільні точні вимірювання у несприятливих умовах навколишнього середовища, таких як туман, пил або дим, завдяки впровадженню методики „останнього вимірювання імпульсу”, що гарантує повернення дальності цілі замість діапазону, створеного розсіюванням із середовища. Діапазон вимірювання LiDAR перевищує інші технології зондування дальності, що використовуються в робототехніці і може досягти для деяких моделей величини декількох кілометрів.

Якщо лазерний промінь падає на об'єкт, частина променя відбивається назад до LiDAR, реєструючись його приймачем. Час між передачею та прийомом імпульсного сигналу прямо пропорційний відстані між LiDAR та об'єктом (рис. 1.2, а). Лазерний імпульс відводиться послідовно з певним кутовим інтервалом за допомогою внутрішнього обертового дзеркала, досягаючи віялоподібного двовимірною сканування полярних координат навколишньої області (рис. 1.2, б) [12].

Розміри поперечного перерізу променя збільшуються, коли він віддаляється від датчика, оскільки цей ефект відрізняється для кожної системи LiDAR. Розмір площі лазерного імпульсу в поперечному перерізі, як правило, визначається із використанням середнього діаметра, який також називають «діаметром лазерного сліду». Датчики LiDAR, як правило, надають два значення, що використовуються для визначення розміру поперечного перерізу лазера як функції відстані виявлення, що істотно різняться між марками та

моделями LiDAR: початковий розмір перерізу, коли імпульс залишає датчик; і розбіжність пучка, що описує збільшення розміру з відстанню (рис. 1.2, в).

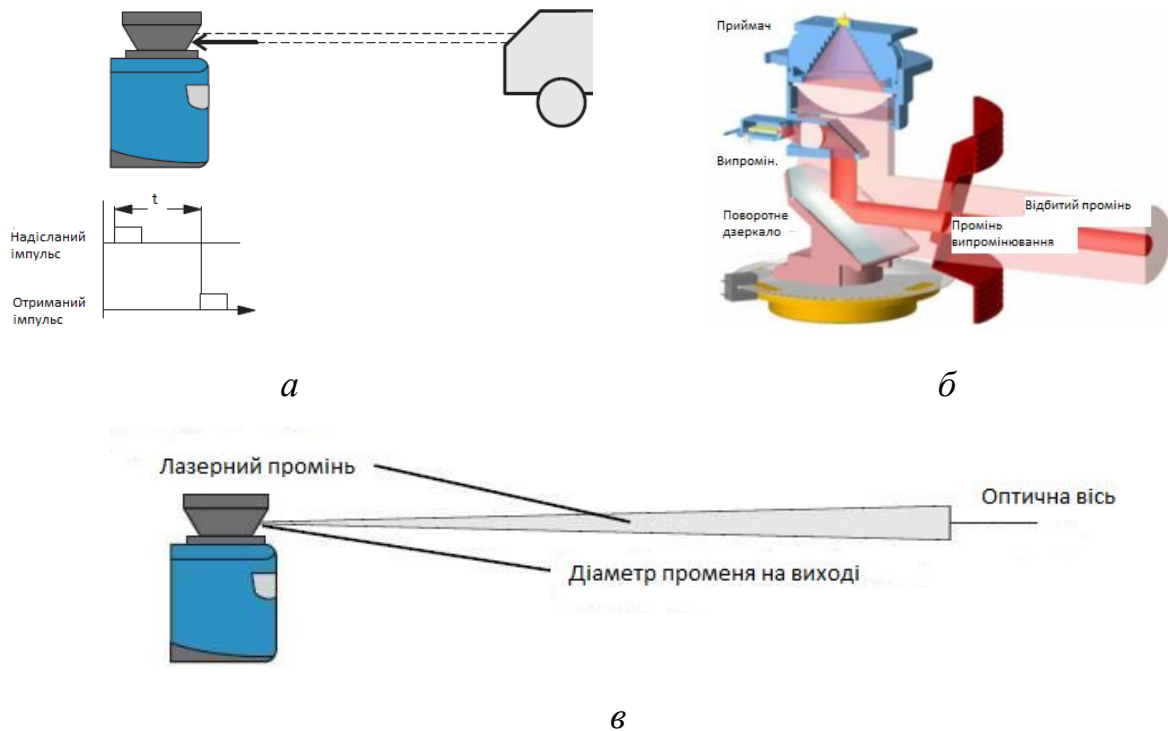


Рис. 1.2. *а* – Принцип дії для вимірювання часу поширення імпульсу. *б* – Основні внутрішні компоненти LiDAR. *в* – Поширення променя.

В попередніх дослідженнях емпірично оцінили поведінку лазерного променя, випромінюваного конкретною моделлю LiDAR (LMS-200, SICK AG, Waldkirch, Німеччина). Було помічено, що поперечний переріз лазерного променя мав прямокутну форму (на відміну від круглої, як сказав виробник), обертаючись одночасно з інерційним обертним дзеркалом датчика, та з неоднорідним профілем опромінення (рис. 1.3)

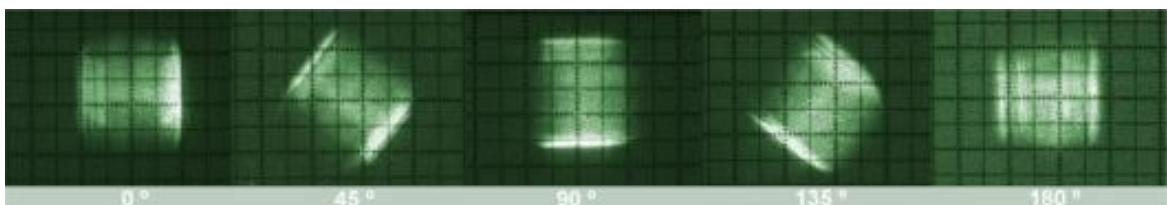


Рис. 1.3. Фотографія поперечних перерізів променя, що випромінюються при  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  та  $180^\circ$ .

Що стосується розбіжності променя, результати показали, що його зростання були різними для кожної осі, вищим для більшої сторони, що

збігалось з інформацією, наданою виробником (рис. 1.4). Таким чином, кругова пляма, визначена у технічних специфікаціях, описує фактично випромінюваний пучок прямокутного перерізу [16-18].

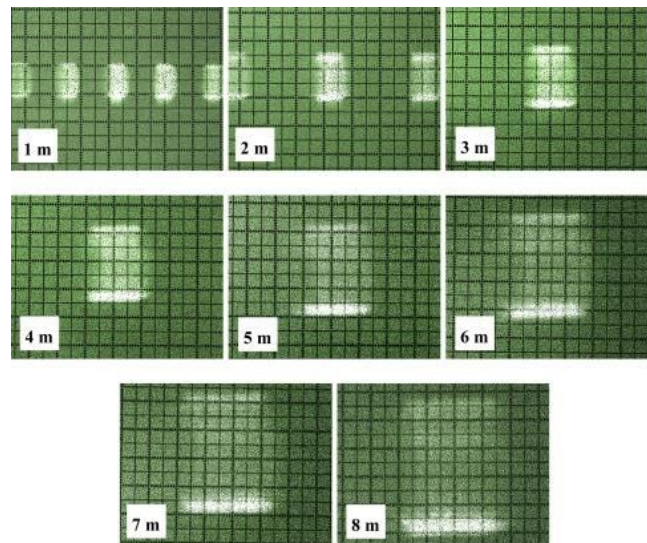


Рис. 1.4. Фотографії перерізу лазерного променя на відстані від 1 до 8 м від датчика.

## Висновки по розділу 1

Активна природа датчиків LiDAR забезпечує дві цінні відмінності, не доступні пасивним методам. Перший – це міра дальності між датчиком і матеріалом, який перехопив випромінене світло, що використовується для оцінки відстані (пояснено раніше), а другий – це міра інтенсивності, яка була отримана, відома як відбивна здатність.

## РОЗДІЛ 2

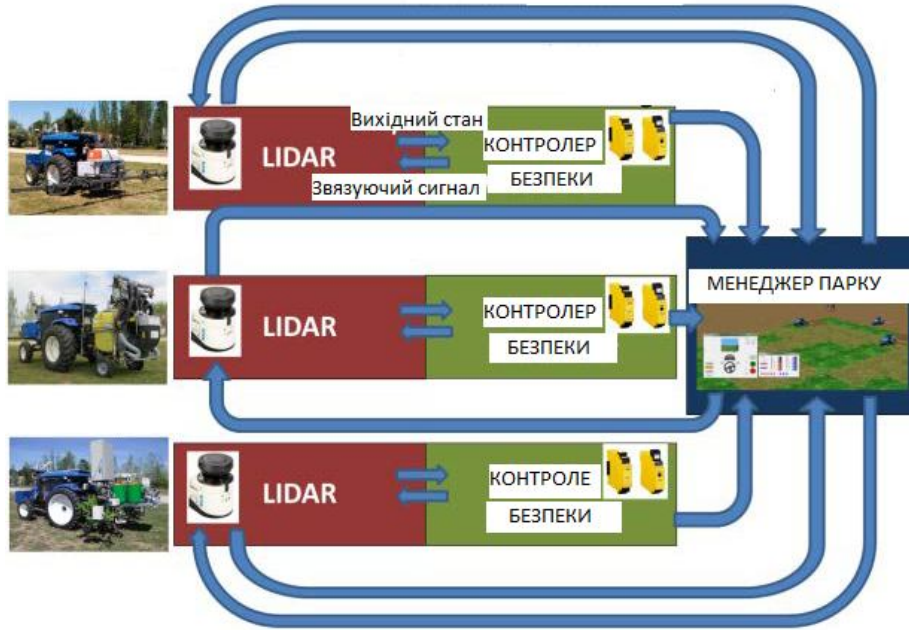
### ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Як вже зазначалося раніше, нами запропонована використовувати систему LiDAR для забезпечення безпечного пересування автономного тракторного агрегату в мультиагентному середовищі.

У цьому розділі розроблена система безпеки, призначена для виявлення людини або предметів, що перебувають перед агрегатом. Система безпеки утворена кількома підсистемами, ієрархічно взаємопов'язаними. На рівні окремого підрозділу виявляються перешкоди, пов'язані з потенційним ризиком (підсистема "Детектор перешкод"), що активує гальмівну систему роботів у реактивному режимі, коли це потрібно (підсистема "Контролер транспортного засобу"). Нарешті, на рівні парку машин підсистема Mission Manager відповідає за уникнення можливих зіткнень при плануванні шляху.

Метою системи безпеки є запобігання можливим зіткненням автономного тракторного агрегату з будь-якими перешкодами, включаючи людей або інші засоби, під час автономної експлуатації. Запобігання зіткненням на рівні флоту (рис. 2.1, а) здійснює керівник місії, використовуючи картографування полів та інформацію про позиціонування автономного тракторного агрегату. Очікується, що менеджер парку запобігає будь-яким зіткненням між автономними тракторними агрегатами або статичними перешкодами наявними на місцях, шляхом планування шляху та призупинення окремих підрозділів. Однак на рівні одиниці виявлення перешкод базується на системі LiDAR. Всі три автономних тракторних агрегати були обладнані переднім LiDAR для виявлення перешкод. Було налаштовано динамічне поле захисту (приспособлене для реалізації різної довжини при зміні швидкості автономного тракторного агрегату). При вторгненні в зону дії LiDAR спрацьовує аварійна зупинка а за командою контролера безпеки (рис. 2.1, б). Зв'язок між LiDAR та контролером безпеки гарантується за допомогою продубльованого дротового з'єднання, яке

чергує сигнали стану та виявлення (відсутність сигналу стану призведе до аварійної зупинки в будь-який час).



а)



б)

Рис. 2.1. Взаємодія на рівні окремих одиниць (а), взаємодія на рівні парку (б).

Виробнича перевірка цих підсистем вимагала оцінки гальмівного шляху та впливу вібрацій та пилу на роботу системи для адаптації динамічного поля захисту до реальних робочих умов.

Вимоги до підсистеми виявлення перешкод були встановлені на основі міжнародного стандарту ISO 18497: Безпека високоавтоматизованих сільськогосподарських машин. Важливим обмеженням для цієї підсистеми є те, що рух назад був заборонений для автономного тракторного агрегату, отже поле динамічного захисту охоплює лише передню область транспортних засобів.

Підсистема виявлення перешкод базується на використанні зовнішнього датчика LiDAR, модель LMS 111 (Німеччина). Характеристики датчика LMS детально описані в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. – Технічні дані LMS 111.

Показник	Значення
Робочий діапазон	від 0,5 до 20 м
Кутова роздільна здатність	0,25°
Джерело світла	інфрачервоне (905 нм)
Поле зору / кут сканування	270°
Клас LiDAR	1 (EN / IEC 60825-1)
Частота сканування	25 Гц
Інтерфейс даних	Ethernet (10/100 Мбіт/с)
Діапазон температур	-30 °C ... + 50 °C
Вібростійкість	згідно з EN 60 068J2J6 (1995J04)
Діапазон частот	10 Гц - 150 Гц
Розбіжність колімованого пучка (суцільний кут)	15 мрад
Систематична похибка	± 30 мм
Статистична похибка	± 12 мм

Стандартна перешкода була побудована відповідно до вимог ISO 18497 (рис. 2.2). Ця стандартна перешкода являє собою невелике місце для сидіння людини (тулуб і голова) і була використана для демонстрації високого рівня виявлення перешкоди під час контролю середовища, а також нормальної роботи під час руху (до максимально допустимої швидкості включно).

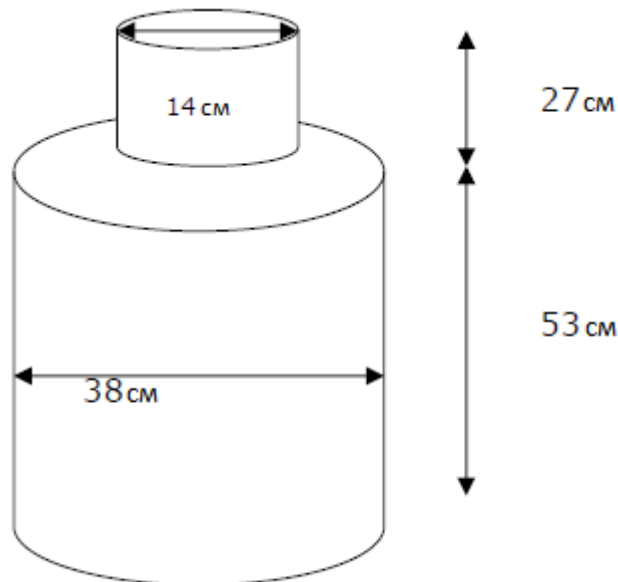


Рис. 2.2. Розмір перешкод.

Датчик LiDAR був встановлений посередині передньої частини трактора та з конфігурацією штовхача ( $4^\circ$  нахилу) для виявлення перешкод вздовж траєкторії транспортного засобу з дорожнім просвітом 70 см (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Встановлена на мобільну сільськогосподарську машину система автоматизації.



Правильна робота LiDAR вимагає визначення області тестового поля. Ця зона складалася із статичного сегментованого поля, де слід постійно виявляти перешкоди. Зона поля захисту була визначена для виявлення будь-якої перешкоди вздовж траєкторії руху. Ця область була представлена динамічним полем, яке охоплює прямокутник перед автомобілем із фіксованою шириною та змінною довжиною (рис. 2.4).

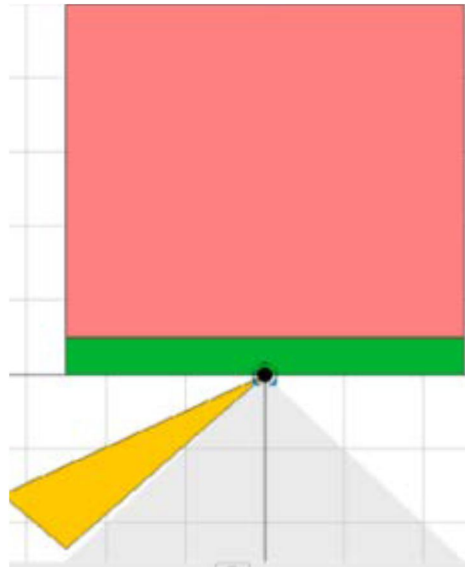


Рис. 2.4. Виявлення поля в LiDAR. Зеленим/червоним кольором – динамічне поле захисту, де зелена зона відповідає 0 км/год, а червона зона – максимальній швидкості. Жовта зона – тестове поле, яке шукає пост кнопки аварійної зупинки.

Розміри поля захисту визначали на основі ширини знарядь, поворотів на кінці поля та часу. Площа випробувального поля та захисна зона були визначені та налаштовані за допомогою програмного інтерфейсу SOPAS. Що стосується методу оцінки вторгнення за допомогою програмного забезпечення SOPAS, то загасаюча оцінка була використана як стратегія уникнення помилкових спрацьовувань, виявляючи лише об'єкти, розмір яких перевищував 50 см.

Таким чином, три виходи від LiDAR були підключені до контролера безпеки.

Для оцінки впливу вібрацій на підсистему виявлення перешкод були проведені специфічні випробування з використанням ІМУ (модель EM-IMU350CA-300, виробник MEMSIC) та тривісного акселерометра (модель 65-10, виробник Meggitt's Endevco) встановлений та синхронізований на LMS-111 (рис. 2.5).

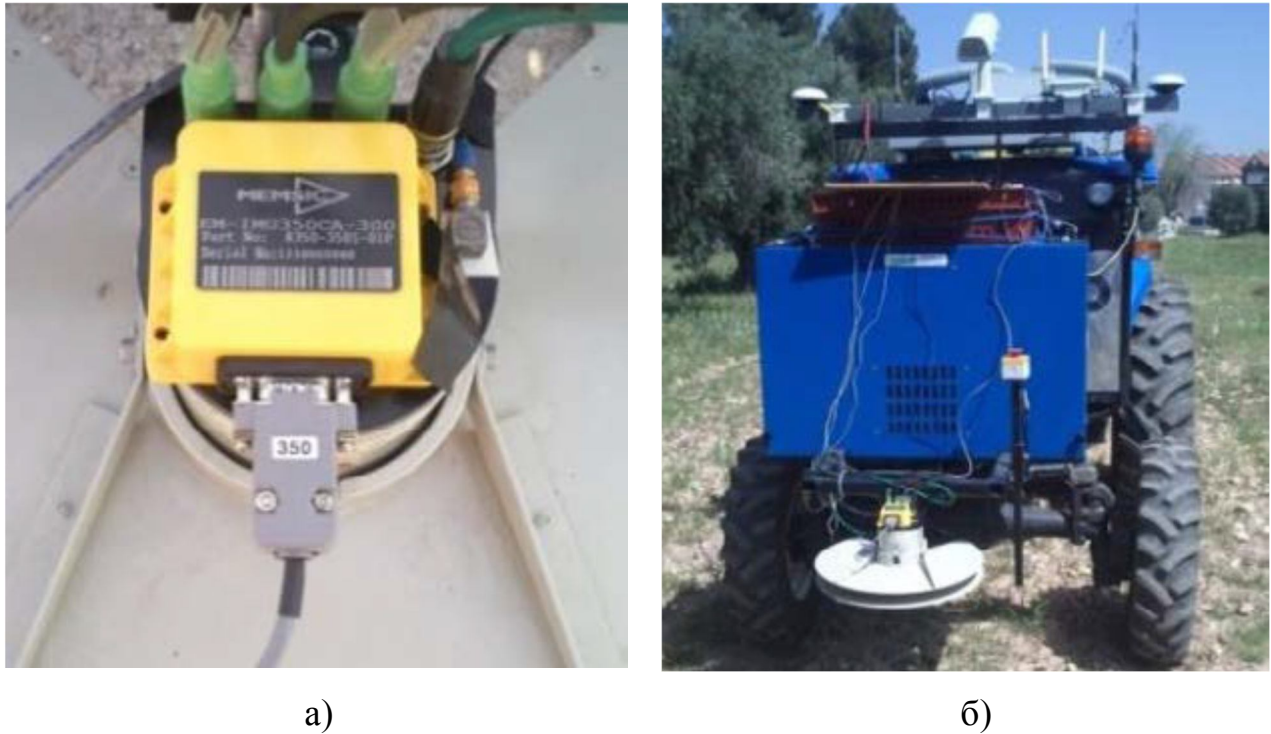


Рис. 2.5. Встановлений ІМУ та тривісний акселерометр на мобільному агрегаті (а) та загальний вигляд системи (б).

ІМУ реєстрував вібрації через GMU вперед (вісь  $x$ ), право-ліво (вісь  $y$ ); та напрямків вгору-вниз (вісь  $z$ ). Він був безпосередньо підключений до комп'ютера за допомогою кабелю RS-232, оскільки його дані записувались через власне програмне забезпечення компанії. Акселерометр був підключений до картки (NI 9234), яка була пов'язана на Chasis (NI cDAQ-9174). Дані акселерометра реєстрували за допомогою програмної програми Labview.

Під час випробування частоту запису LiDAR було встановлено на 25 Гц з кутовою роздільною здатністю  $0,25^\circ$ ; використовували три різних типи ґрунту для оцінки статичних вимірювань (асфальт; орона кукурудза; та кам'яниста перепади, рис. 2.6); та дві швидкості на динамічних випробуваннях

асфальту (1,69 км/год та 5,63 км/год). Для того, щоб отримати стабільні сигнали від LiDAR, ряд дерев'яних дошок було покладено на землю, на постійній висоті та з повторними інтервалами, для реєстрації чітких поздовжніх сигналів виявлення вздовж напрямку руху.

*a**б**в*

Рис. 2.6. Випробування на вібрацію на асфальтовому покритті (*a*), поле після оранки (*б*) та кам'яниста ділянка (*в*).

Вплив пилу.

Частинки пилу (рис. 2.7), краплі дощу, сніжинки тощо (так зване забруднення) мають прямий вплив на відстань вимірювання навколишнього середовища датчиками LiDAR. З цієї причини забруднення вимірюється постійно, коли пристрій працює. Для певного рівня забруднення спочатку видається попередження про забруднення, якщо забруднення стає гіршим, видається помилка забруднення і LiDAR припиняє проводити вимірювання.



Рис. 2.7. Частинки пилу, які впливають на роботу LiDAR.

Для усунення впливу факторів, які впливають на точність системи LiDAR були встановлені високочастотні фільтри.

## **Висновки по розділу 2**

В другому розділі представлено будову запропонованої системи для автоматизації мобільних сільськогосподарських машин на основі використання датчиків LiDAR та розроблена методика проведення досліджень.

### РОЗДІЛ 3

#### РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження були спрямовані на виявлення перешкод під час роботи автоматизованої мобільної сільськогосподарської машини за допомогою розробленої системи.

Дослідження гальмівного шляху показали, що при виконанні найбільш енергозатратної операції (міжрядний обробіток) гальмівний шлях був стабільно на 0,5 м довшим, ніж у найменш енергозатратної операції (обприскувач для яблуневих садів). Не виявлено суттєвих відмінностей щодо інших факторів, таких як режим системи активації (дистанційна або бортова аварійна кнопка) або тип поверхні (асфальт або ґрунт). На рис. 3.1 показано пройдені відстані після того, як поступив сигнал екстреної зупинки під час фізичного тестування на гальмування при міжрядному обробітку. Отримано максимальну пройдену відстань  $1910 \pm 86,87$  мм, яка згодом була використана для визначення зони захисту поля LiDAR.

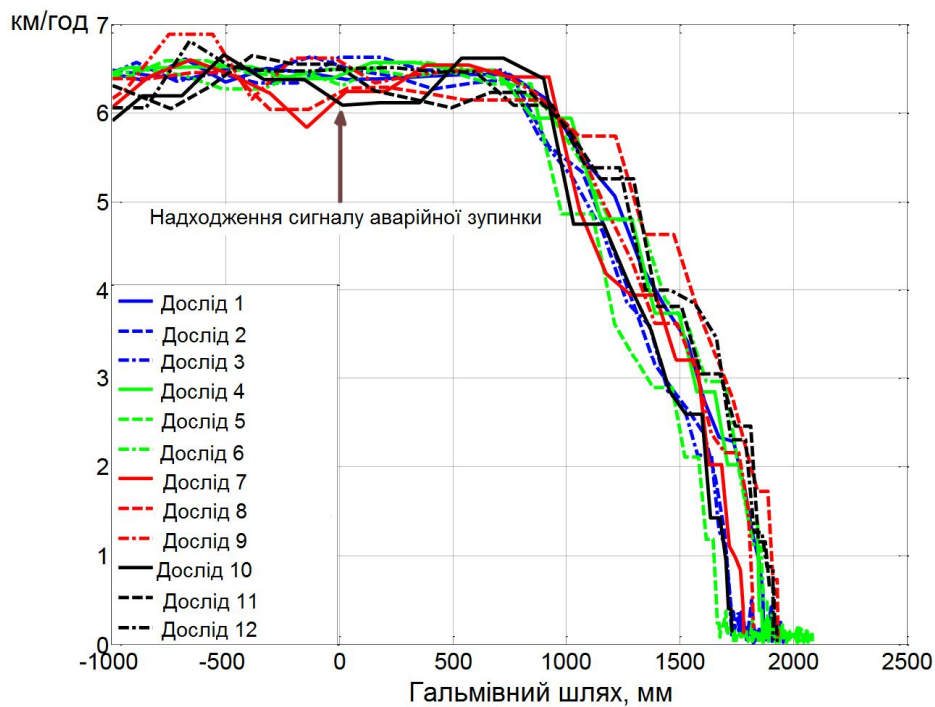


Рис. 3.1. Залежність гальмівного шляху від швидкості під час міжрядного обробітку.

Довжина поля захисту на максимальній швидкості, як було сказано вище, була налаштована шляхом додавання максимального гальмівного шляху, отриманого під час випробування (1910 мм, рис. 3.1), та відстані пройденої за час відгуку LiDAR (167 мм за 100 мс при 6 км/год) і помноживши це значення на коефіцієнт безпеки 2. Таким чином отримують значення 4150 мм як довжину поля захисту при максимальній швидкості. Адаптація цієї області до результатів, отриманих у цьому тесті, дозволяє генерувати сигнал зупинки до того, як автоматизована сільськогосподарська машина зіткнеться з перешкодою.

Щодо мінімальної довжини, було оцінено два різні варіанти (1 м та 0,5 м) (рис. 3.2.).

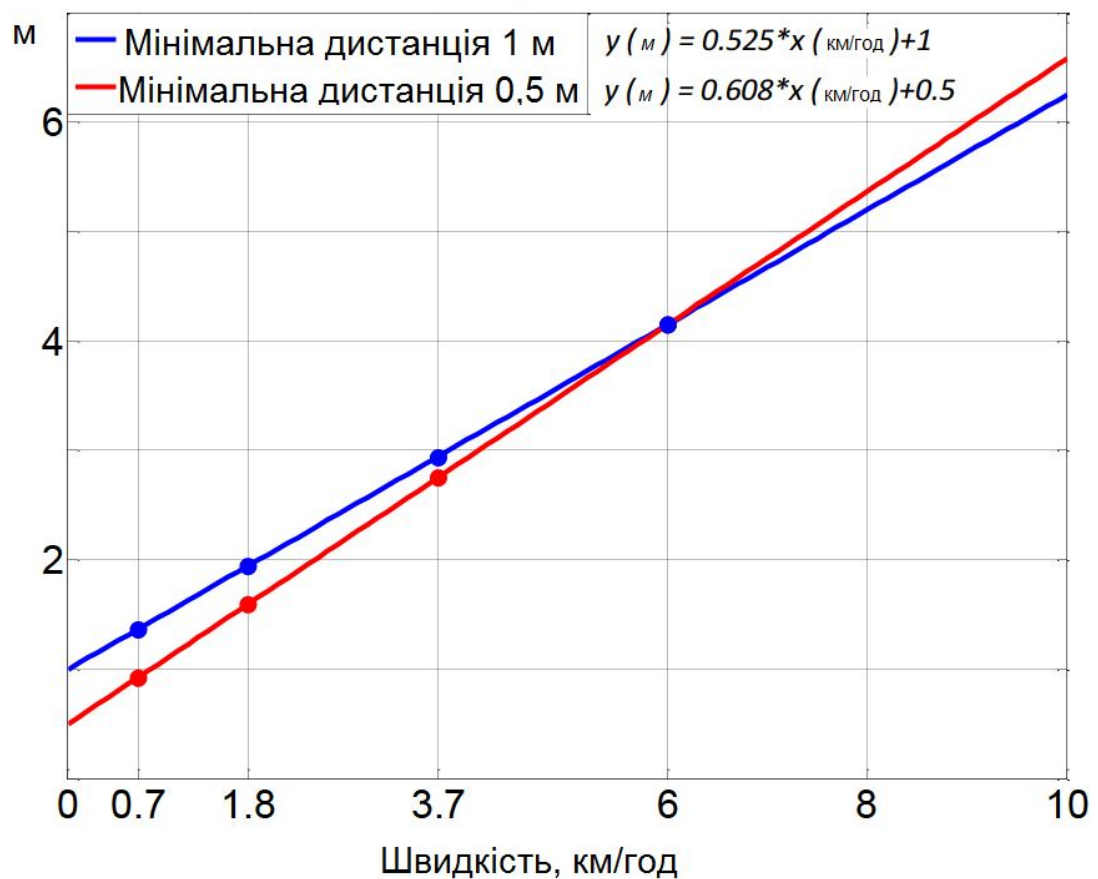


Рис. 3.2. Динамічна довжина поля захисту для 1 м та 0,5 м при різних швидкостях.

Графік представлений на рис. 3.3. узагальнює вільні відстані до отриманої перешкоди у відсотках від довжини динамічного поля захисту при чотирьох швидкостях, доступних за допомогою пульта дистанційного керування для зупинки автоматизованої мобільної сільськогосподарської машини. Під час експериментів затримка безпеки була збільшена для конфігурації 0,5 м з метою вирішення проблем невідповідності. Цей факт був зроблений на підставі спостереження відсотка вільної відстані, отриманого при максимальній швидкості на обидві налаштовані відстані. Таким чином, був отриманий різний відсоток відстані для обох конфігурацій на максимальній швидкості (6 км/год.).

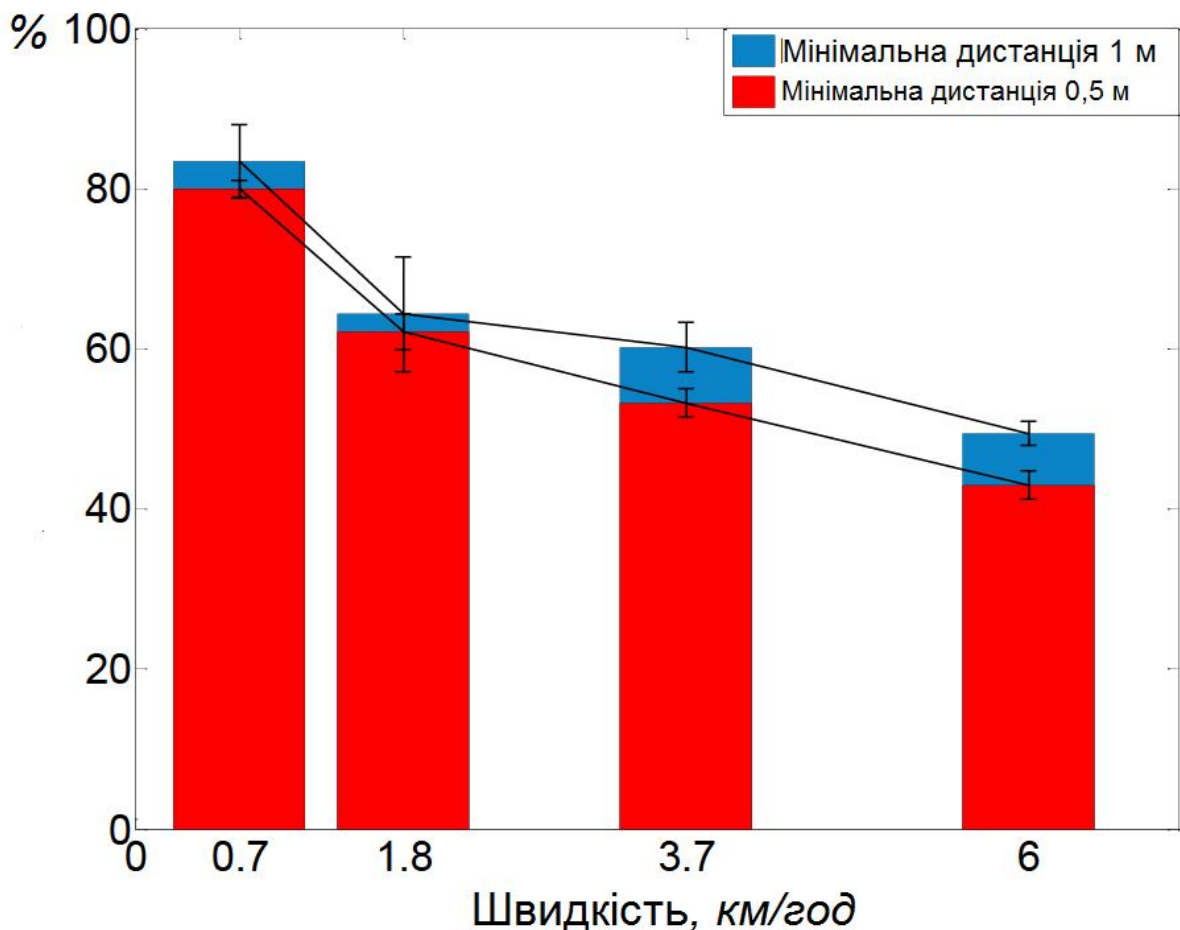


Рис. 3.3. Вільна відстань до перешкоди, пов'язана з довжиною поля захисту, отримана з різною швидкістю з двома конфігураціями поля захисту.

За результатами проведених експериментів було обрано відстань мінімальної довжини 0,5 м. Завдяки коефіцієнту захисту 2, який використовувався у для розрахунку максимальної довжини поля захисту, було

задоволено вимогу безпеки руху до автоматизованих мобільних сільськогосподарських машин.

Під час випробувань на статичні вібрації була отримана велика різниця у профілі дерев'яних дощок (які використовувались у вигляді перешкод) для кожного з типів покриттів дороги(див. рис. 3.4).

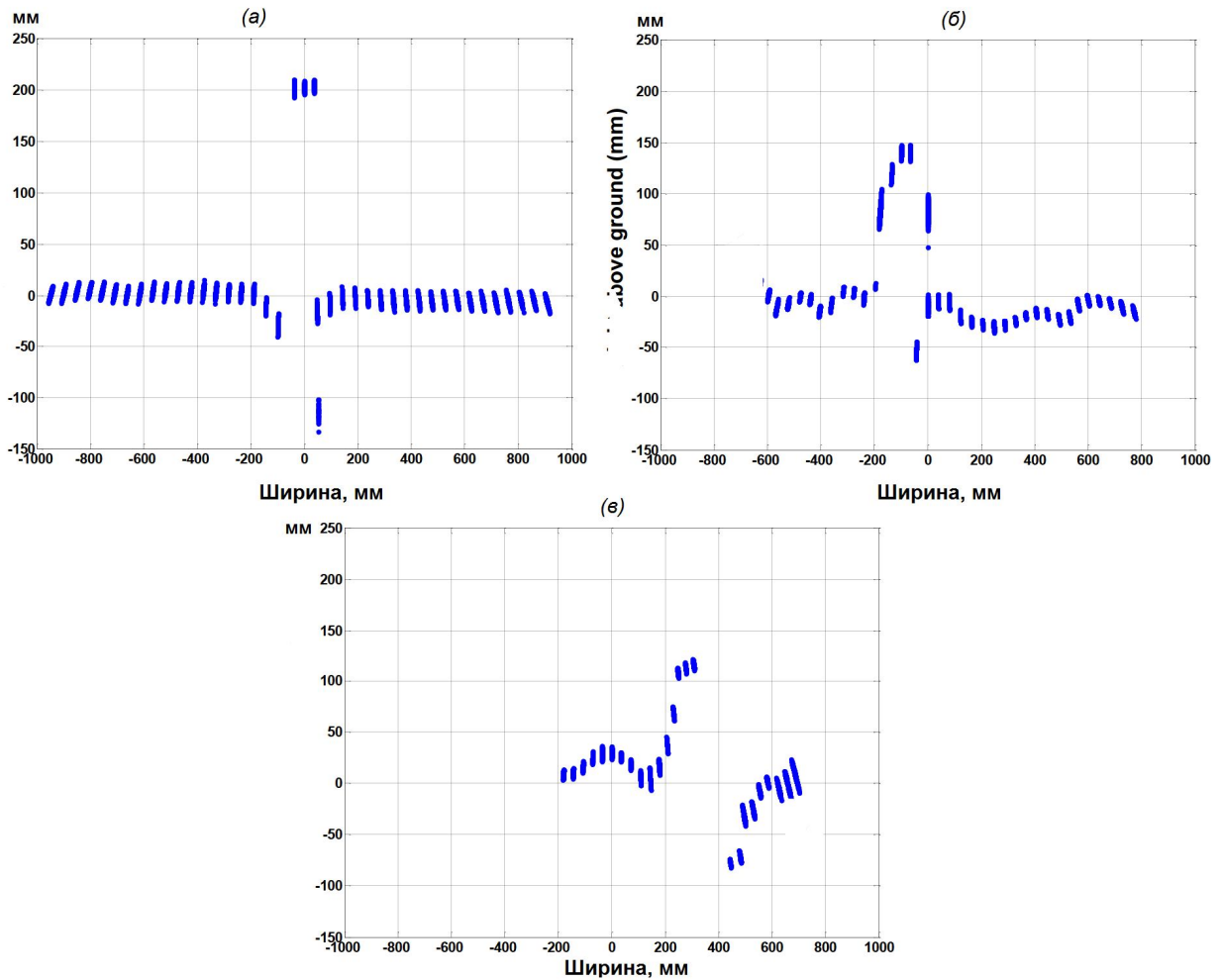


Рис. 3.4. Вигляд дошки під час статичного випробування для: (а) – покриття асфальт; (б) – покриття рілля після кукурудзи; (в) – кам'яниста поверхня.

Для всіх статичних випробувань оцінювали вплив вібрацій двигуна трактора на точність виявлення висоти (рис. 3.5). Під час перевірки статичної висоти перешкоди великої різниці в виміряному діапазоні не спостерігалось, оскільки це межі діапазону, які містять 95% даних 198,42...207,49 для вимкненого двигуна; та 196,51...207,93 для роботи на холостого ходу. Таким



чином, відбулося збільшення діапазону висоти на 25%, що може здатися великим відсотком, але насправді це означає збільшення дальності всього на 2,35 мм.

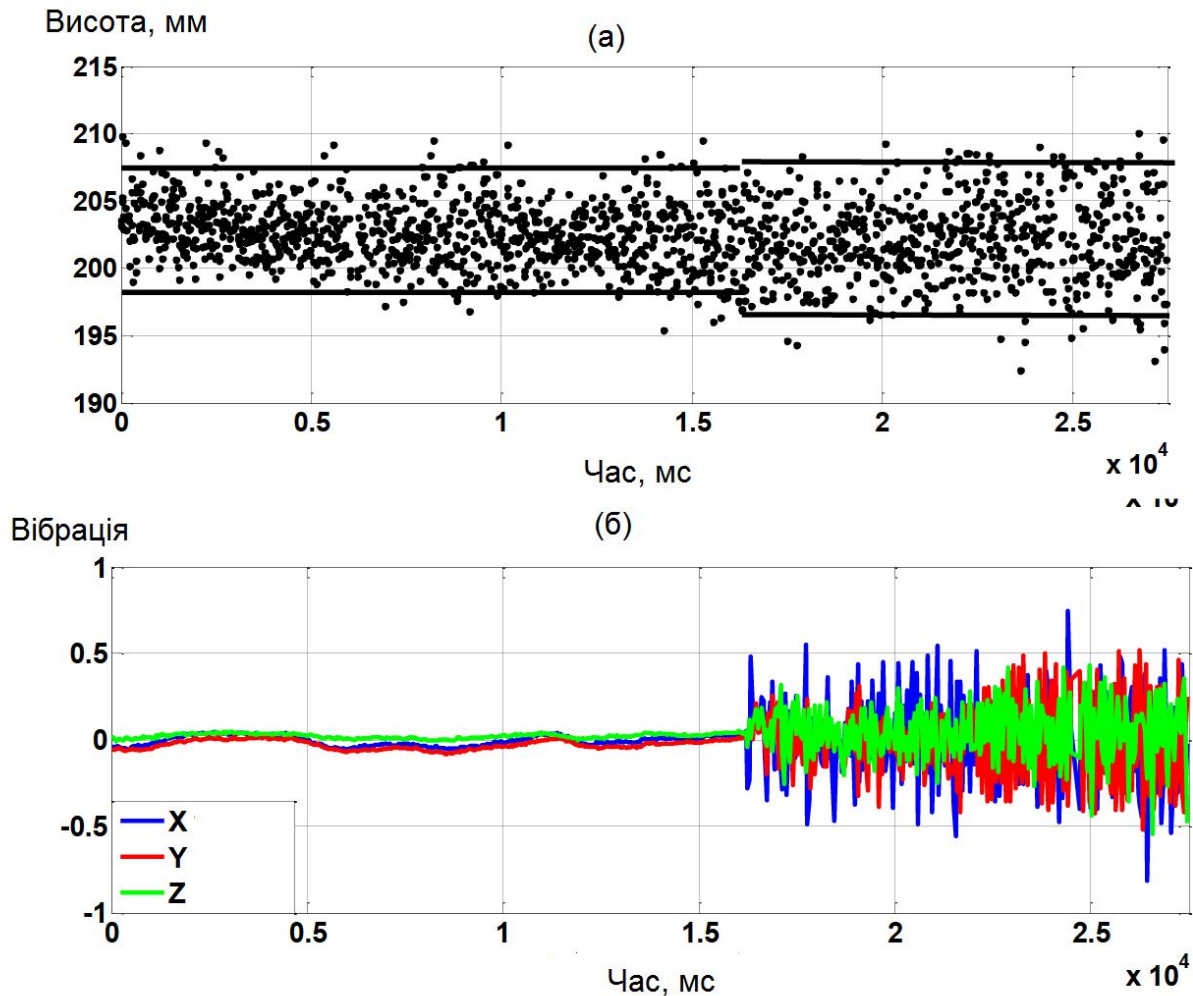


Рис. 3.5. Діапазон точності висоти, представлений суцільними лініями, які містять 95% даних (а); вібрації, які зазнає LiDAR під час статичного випробування на асфальті (б).

### Висновки по розділу 3

Для розробки системи безпеки автономних мобільних сільськогосподарських машин важливим моментом є вивчення та аналіз чинних стандартів безпеки. Ці знання допоможуть визначити найбільш актуальні небезпеки та способи їх зменшення.

Важливою складовою під час розробки безпечного автономного сільськогосподарського агрегату засобу є виявлення людини або предметів усередині смуги руху. Цю проблему вирішено шляхом впровадження системи безпеки шляхом інтеграції трьох різних підсистем, ієрархічно взаємопов'язаних.

Поєднання цих підсистем безпеки дозволило виявити перешкоди на рівні окремого блоку, а також уникнути можливі зіткнення машин при плануванні шляху.

Вибір LiDAR в якості датчика безпеки автономних мобільних сільськогосподарських машин виявився доцільним, але його потрібно точно відрегулювати для кожного робочого процесу з точки зору можливих зовнішніх факторів (пил, дощ, вібрація, шорсткість землі та кут нахилу) та врахування захисного поля (залежно від швидкості руху та можливостей гальмування).

Загальна система безпеки, яка може бути застосована до будь-якого багатоагентного парку, інтегрована на кожній автономній машині.

## ВИСНОВКИ

Під час аналізу літературних джерел продемонстровано великий потенціал використання датчика LiDAR в сільськогосподарському комплексі для автоматизації технологічних процесів.

Система безпеки була розроблена відповідно до діючих норм безпеки, що допомогло у визначенні та зменшенні найбільш важливих ризиків, визначивши керівні принципи та межі експлуатації машини. Розроблена загальна система безпеки, яка може використовуватися в будь-якому багатоагентному парку машин, була інтегрована в кожен машину і складалася з декількох ієрархічно взаємопов'язаних підсистем: детектор перешкод; контролер машини та менеджер місії. Поєднання цих підсистем дозволило виявити перешкоди на індивідуальному рівні, а також запобігти можливим зіткненням машин на рівні парку.

Результати, отримані під час експлуатаційних випробувань, продемонстрували потенціал використання LiDAR як датчика безпеки, здатного виявити 100% перешкод.

Датчик LiDAR продемонстрував свою надійність при використанні в якості запобіжного пристрою, оскільки він здатен підлаштовуватися під можливі перешкоди для кожного технологічного процесу (пил, дощ, вібрація та нахил місцевості), а також визначення розмірів захисного поля (залежно від швидкості машини, гальмівної здатності та конструкції самого запобіжного контуру).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Волощук Ю. О. Напрями цифровізації аграрних підприємств. Ефективна економіка. 2019. № 2. URL: [http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/2\\_2019/68.pdf](http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/2_2019/68.pdf).
2. Циганенко М., Макаренко М. Система точного землеробства економить ваші гроші. Пропозиція. 2017. № 2. С. 56–59.
3. Никола М. Т., Самуэль В. Цифровые технологии на службе сельского хозяйства и сельских районов: справочный документ. Рим : Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций, 2019. 18 с.
4. Новітні технології у рослинництві / В. Д. Паламарчук, І. С. Поліщук В. А. Мазур, О. Д. Паламарчук. Вінниця, 2017. 602 с.
5. Станции точного позиционирования, полевые лаборатории, сканеры почвы и другие решения для украинских фермеров . URL: <https://systemnet.com.ua/ua/gmsp/> (дата звернення 21.11.2020).
6. Rusu R. B. Close-range scene segmentation and reconstruction of 3D point cloud maps for mobile manipulation in domestic environments. *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on IEEE*, 2009. p. 1-6.
7. Погоріла А. Використання GPS та GIS систем у точному землеробстві. Перспективи розвитку в Україні. Skok Agro. 2016. Режим доступу. <http://agromonitor.pro/?p=226>.
8. Морозов В. В., Лисогоров К. С., Шопаринська Н. М. Геоінформаційні системи в агросфері: навч. посібник. Херсон, Вид-во ХДУ, 2007 223 с.
9. Zhuang Y. et al. A novel outdoor scene-understanding framework for unmanned ground vehicles with 3D laser scanners. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2015. Vol. 37, no. 4, pp. 435-445.

10. Matsumura J.M. An Alternative Approach for Assessing and Implementing Autonomous Ground Robotic Systems [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://repository.cmu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1185&context=dissertations>.

11. Міхеєв Є. К., Лисогоров К. С. Автоматизована система підтримки технологічних рішень в системах точного землеробства. Херсон : Вид-во ХДУ, 2006 . 91 с.

12. Труфляк Е. В. Точное сельское хозяйство: вчера, сегодня, завтра. *British Journal of Innovation in Science and Technology*, 2017, Т. 2. № 4. С.15–26.

13. Jaffe E. The First Look at How Google's Self-Driving Car Handles City Streets [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.citylab.com/tech/2014/04/firstlook-how-googles-self-driving-car-handles-city-streets/8977>.

14. BMW делает ставку на беспилотные автомобили. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://sunnapress.com/news/science/4050-bmw-delaet-stavku-na-bespilotnyeavtomobili.html>.

15. Ольга Куряча. Роботы за рулем! Беспилотные автомобили на наших дорогах. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://robotics.com.ua/shows/series\\_robots\\_and\\_humans/1241-robots\\_behind\\_the\\_wheel\\_unmanned\\_vehicles\\_on\\_our\\_roads](http://robotics.com.ua/shows/series_robots_and_humans/1241-robots_behind_the_wheel_unmanned_vehicles_on_our_roads)

16. Autonomous car development company Waymo [Электронный ресурс] URL: <https://waymo.com>.

17. Абраменко А. А., Левашев С. П. Распознавание объектов по данным мобильного лазерного сканирования на основе метода моментов. *Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности. Сборник статей I Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов*. Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2015. С. 12-15.

18. ISO 18497:2018. Agricultural machinery and tractors – Safety of highly automated agricultural machines. Principles for design. 18 p.