

DOI: <https://doi.org/10.26565/2519-2310-2024-2-03>

УДК 004.896

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА БЕЗПЕКА ЕЛЕКТРОСАМОКАТІВ З ТЕХНОЛОГІЄЮ SMARTSTOP

Тетяна Коробейнікова¹, кандидат технічних наук, доцент,
e-mail: tetiana.i.korobeinikova@lpnu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2487-8742>
Олександр Ремінний¹, кандидат технічних наук, асистент, e-mail: sasha.reminnyi@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5119-3695>
Даніель Гада¹, студент кафедри комп'ютеризованих систем автоматики,
e-mail: daniel.hada.ir.2023@lpnu.ua
Артем Гада¹, студент кафедри комп'ютеризованих систем автоматики,
e-mail: artem.hada.ir.2023@lpnu.ua
Назарій Дмитрів¹, студент кафедри комп'ютеризованих систем автоматики,
e-mail: nazarii.dmytriv.ir.2024@lpnu.ua

¹Національний університет «Львівська політехніка»,
вул.С.Бандери, 12, Львів, 79000, Україна

Рукопис надійшов 21 жовтня 2024 р. Отримано після рецензування 22 листопада 2024 р.
Прийнято 22 грудня 2024 р.

Анотація: У статті розглянуто проблему підвищення безпеки електросамокатів у міському середовищі через розробку та впровадження інтелектуальної системи SMARTSTOP. Запропонована система базується на адаптивному контролі швидкості та автоматизованому гальмуванні з використанням сенсорних технологій та алгоритмів реального часу. Ключовими компонентами системи є ультразвукові датчики, мікроконтролер Arduino Nano, потенціометр, сервопривід, електродвигун, LCD-дисплей та п'єзодинамік. SMARTSTOP дозволяє ефективно виявляти статичні та динамічні перешкоди у межах 5-6 метрів з кутом огляду 150 градусів, визначати рівень загрози і відповідно реагувати, знижуючи швидкість або ініціюючи автоматичне гальмування. Для тестування системи використано методику Hardware-in-the-Loop (HiL) на платформі MATLAB/Simulink, що дозволило змодельовати різні дорожні сценарії. Результати тестувань підтвердили високу ефективність і точність роботи системи, яка забезпечує своєчасне реагування на потенційні небезпеки. Подальші напрями розвитку передбачають вдосконалення алгоритмів для складних умов експлуатації та інтеграцію SMARTSTOP з технологіями «розумного міста».

Ключові слова: електросамокат, безпека руху, адаптивний контроль швидкості, автоматичне гальмування, SMARTSTOP, ультразвукові датчики, Arduino Nano, HiL, міська мобільність

Як цитувати: Коробейнікова Т., Ремінний О., Гада Д., Гада А., Дмитрів Н. (2024) Інтелектуальна безпека електросамокатів з технологією SMARTSTOP. *Комп'ютерні науки та кібербезпека*. 2024; № 2(26): С. 25–40. <https://doi.org/10.26565/2519-2310-2024-2-03>

In cites: Korobeynikova T., Reminnyi O., Gada D., Gada A., Dmytriv N. (2024). Intellectual safety of electric scooters with SMARTSTOP technology. *Computer Science and Cybersecurity*. 2(26): 25–40. <https://doi.org/10.26565/2519-2310-2024-2-03> (in Ukrainian)

1. Вступ

Сучасні міста з їх інтенсивним трафіком та обмеженим простором для транспорту потребують розв'язання проблеми ефективності, безпеки та екологічності міського транспорту. Водночас зростає популярність електричних транспортних засобів, зокрема електросамокатів, відкриває нові можливості для мобільності в межах урбанізованих територій. Однак, разом із позитивними аспектами, такими як зручність і екологічність, з'являються й нові виклики, особливо у контексті безпеки руху.

Одним з основних аспектів безпеки є інтеграція інтелектуальних систем контролю, здатних адаптувати швидкість та забезпечити своєчасну реакцію на змінні умови навколишнього середовища. Важливу роль у таких системах відіграють сенсорні технології, які забезпечують моніторинг простору навколо транспортного засобу, а також алгоритми, що дозволяють автоматично виявляти перешкоди та регулювати швидкість. Подібні технології активно розвиваються і вже знайшли застосування в комерційних продуктах, що включають алгоритми для контролю швидкості та запобігання зіткненням.

Однак, у той час, коли більшість існуючих систем розроблені для велосипедів або автомобілів, розробка системи, орієнтованої на електросамокати, залишається малодослідженою. Це обумовлено необхідністю адаптації технологій до специфіки руху електросамокатів, зокрема у контексті маневрів в умовах щільного міського середовища, де частіше виникають перешкоди та непередбачувані ситуації.

В рамках цієї роботи досліджується та розробляється система SMARTSTOP, яка поєднує адаптивне пригальмовування з автоматичним контролем швидкості. Система здійснює моніторинг оточення на відстані 5-6 метрів і забезпечує реакцію на зміни дорожніх умов, гарантуючи безпечне маневрування для користувачів електросамокатів. Вона адаптується до різних ситуацій, таких як перешкоди на дорозі чи зміна швидкості інших учасників дорожнього руху, знижуючи ймовірність ДТП та забезпечуючи зручність у користуванні.

Детальніше розглянувши *проблеми безпеки в галузі адаптивного пригальмовування*, можна відзначити, що, всупереч численним досягненням в галузі систем допомоги водіям для різних типів транспорту, адаптивний контроль швидкості та виявлення перешкод у міському середовищі залишається відкритим питанням. Особливо це стосується електросамокатів, де динаміка руху є більш непередбачуваною, а маневри, такі як швидкі повороти або зміна напрямку, є звичними для користувачів. Це створює додаткові труднощі для розробки систем, які можуть своєчасно реагувати на виникаючі загрози.

Однією з основних проблем є виявлення перешкод на велодоріжках і в прилеглих зонах. Природа таких перешкод різноманітна: це можуть бути пішоходи, інші транспортні засоби або об'єкти, що знаходяться на доріжці або поблизу неї. Враховуючи змінні умови освітлення та погоди, а також часту присутність об'єктів з обмеженою видимістю (наприклад, припарковані транспортні засоби), ефективне виявлення таких перешкод та своєчасне реагування на них є важливими для забезпечення безпеки.

Крім того, складність ситуації полягає в необхідності точного визначення відстані та швидкості об'єкта, що наближається, та правильної оцінки рівня загрози. Перешкоди можуть знаходитися в межах видимості, але на різній відстані від електросамоката, що впливає на вибір стратегії реагування, зокрема щодо активації пригальмовування чи обмеження швидкості. У

випадку множинних перешкод необхідно здійснювати не лише просте їх виявлення, але й аналіз їхнього впливу на траєкторію руху.

Таким чином, розробка алгоритмів адаптивного гальмування, які враховують положення перешкод, їхню швидкість і близькість, є *актуальним завданням* для підвищення безпеки.

2. Статистика безпеки галузі адаптивного пригальмовування

Аналіз ДТП за участю електросамокатів підтверджує актуальність проблеми. У США кількість інцидентів з електросамокатами зросла на 222% з 2014 по 2018 роки, а у 2020 році було зафіксовано понад 3300 випадків. У Франції у 2021 році сталося 408 аварій, що спричинило посилення регулювання. В Україні за останні 5 років було зафіксовано щонайменше 330 випадків ДТП, з яких 34% припали на 2023 рік. У Німеччині лише за 2020 рік було зареєстровано 2155 ДТП за участю електросамокатів, з яких 386 призвели до серйозних травм. Окрім задекларованих інцидентів, значну частку становлять приховані ДТП, які не реєструються офіційно. Оцінка показує, що в середньому 30-40% інцидентів залишаються поза увагою, що створює додаткові труднощі для аналізу та розробки ефективних заходів безпеки (рис.1).

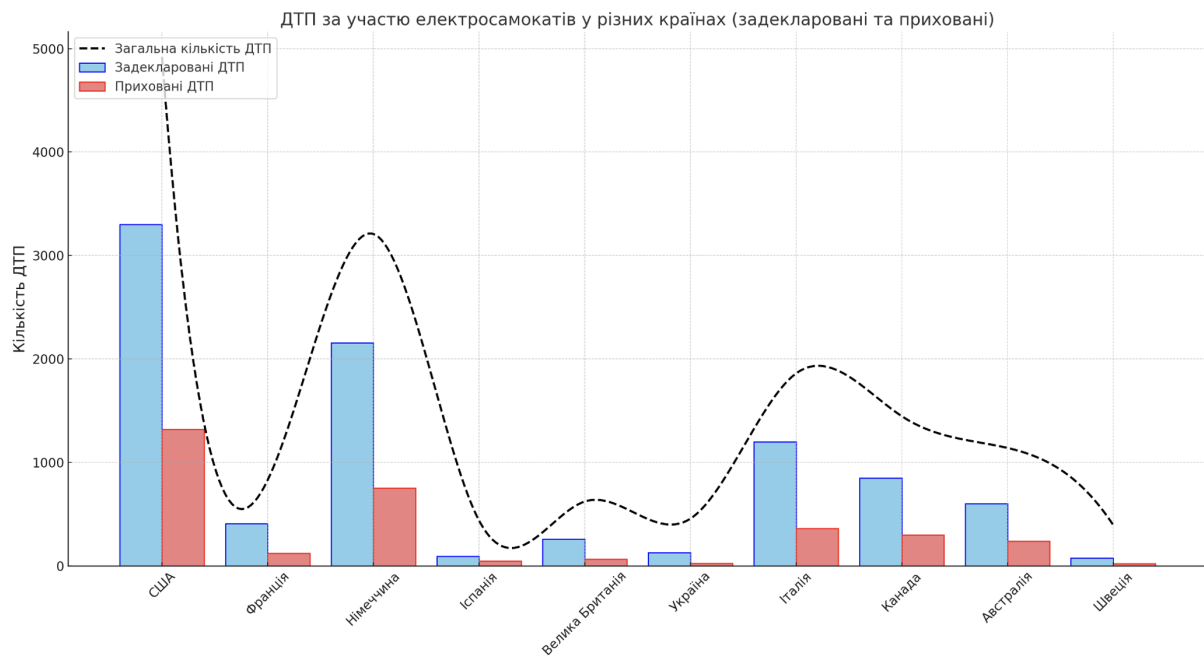


Рис. 1 – Статистика безпеки галузі адаптивного пригальмовування

Fig. 1 – Safety statistics for the adaptive braking industry

Саме тому **метою цієї роботи** є розробка та впровадження *системи адаптивного контролю швидкості та попередження про перешкоди для електросамокатів, яка підвищить безпеку руху в міських умовах*. Система повинна здійснювати моніторинг навколишнього середовища, виявляти як статичні, так і динамічні перешкоди, а також обчислювати відстань до них. Залежно від отриманих даних, система повинна відповідним чином реагувати, активуючи сповіщення користувача та автоматично обмежуючи швидкість або ініціюючи гальмування, коли перешкоди знаходяться в небезпечній близькості. Система має бути інтегрована як комбінація фізичних елементів та програмного модуля, який працюватиме автономно, без підключення до зовнішніх мереж. Її основною функцією є підвищення безпеки електросамоката

в реальному часі, надаючи додаткові можливості для адаптивного управління рухом в умовах міського середовища. Система повинна забезпечувати рівень безпеки не менше 99% у всіх типах ситуацій, запобігаючи потенційним зіткненням та аваріям. Датчики системи повинні безперервно відстежувати ситуацію на дорозі, виявляючи перешкоди в радіусі 5-6 метрів з кутом огляду 150 градусів, і автоматично реагувати на зміну умов, забезпечуючи надійний захист від аварій. Система повинна також мати можливість налаштування або адаптації до різних умов руху та дорожнього середовища.

3. Аналіз наукових досліджень

Враховуючи важливість підвищення безпеки електросамокатів у сучасному міському середовищі, аналіз чинних наукових робіт є необхідним етапом для розуміння технологічних рішень, що можуть бути інтегровані у наш проєкт. Оскільки головним завданням є адаптивне управління швидкістю та гальмами на основі аналізу оточення, особливо з виявленням перешкод, ми зосереджуємося на дослідженнях, які стосуються інтелектуальних систем контролю та гальмування, а також вдосконалення методів запобігання аварійним ситуаціям. У цьому контексті варто звернути увагу на три ключові дослідження, які висвітлюють різні аспекти проблеми безпеки електричних транспортних засобів.

Дослідження класифікації систем інтелектуального контролю для електротранспорту фокусується на різних типах систем безпеки, які сприяють підвищенню безпеки користувачів, зокрема для електротранспорту. В умовах швидко зростаючої популярності цих засобів транспорту необхідно розробляти інтегровані технології, що дозволяють забезпечити надійний захист від аварій та адаптивно реагувати на зміни умов дорожнього руху.

В ході дослідження запропоновано такі категорії інтелектуальних систем контролю.

1. Системи виявлення та запобігання зіткненням (Collision Avoidance Systems): ці системи мають на меті своєчасне виявлення перешкод на шляху транспорту, таких як пішоходи, інші транспортні засоби або нерухомі об'єкти. Вони використовують комбінацію сенсорних технологій, таких як радар, ультразвукові датчики та камери, для забезпечення точного виявлення перешкод. Крім того, ці системи можуть автоматично активувати механізми гальмування для запобігання аварії.

2. Системи адаптивного контролю швидкості (Adaptive Speed Control Systems): ці системи здатні адаптувати швидкість транспортного засобу залежно від умов руху. Вони здійснюють моніторинг відстані до об'єктів попереду та аналізують інтенсивність дорожнього потоку. Система може знижувати швидкість транспортного засобу або обмежувати її, зважаючи на змінювані умови на дорозі, що важливо для забезпечення безпеки в умовах міського трафіку.

3. Системи розпізнавання об'єктів та аналізу дорожнього простору (Object Recognition and Road Analysis Systems): вони використовують алгоритми машинного навчання і комп'ютерного зору для розпізнавання перешкод на дорозі, таких як пішоходи, тварини, інші транспортні засоби, а також для оцінки їхнього розміру та відстані. Це дозволяє системі не лише виявляти небезпечні об'єкти, але й коригувати поведінку транспортного засобу в реальному часі, забезпечуючи максимально безпечний рух.

Проміжні результати дослідження. Подані системи базуються на інтеграції сенсорних технологій і алгоритмів для обробки даних. Для точного визначення відстані до об'єктів використовуються радіолокаційні, ультразвукові та інфрачервоні датчики, а також ширококутні камери. Алгоритми машинного навчання та комп'ютерного зору дозволяють системам ефективно класифікувати об'єкти та реагувати на змінювані умови.

Дослідження підкреслює важливість інтеграції різних сенсорних технологій для забезпечення безпеки електричних транспортних засобів. Впровадження цих систем дозволяє

знижувати ймовірність аварій та підвищувати ефективність транспорту в умовах міського середовища, де постійно змінюються умови руху.

Дослідження «*Bicycle Hardware-in-the-Loop Simulator for Braking Dynamics Assistance System*» присвячене розробці інтелектуальної системи допомоги в гальмуванні (Braking Dynamics Assistance, BDA) для велосипедів, зокрема електричних. Воно використовує методологію Hardware-in-the-Loop (HiL) для симуляції фізичних процесів без проведення реальних фізичних випробувань. Цей підхід дозволяє уникнути ризиків для користувачів і забезпечує прискорений процес розробки та тестування гальмівних систем. Система BDA адаптується до змінних дорожніх умов і забезпечує стабільність при гальмуванні, знижуючи ймовірність аварій, таких як блокування коліс чи перекидання велосипеда.

У ході дослідження була розроблена система, яка складається з декількох ключових компонентів:

1. Сенсори: Включають датчики швидкості коліс, акселерометри для оцінки динаміки велосипеда, а також датчики тиску в гальмівній системі. Ці сенсори надають інформацію про стан руху, дозволяючи визначити, чи є необхідність у коригуванні гальмівної сили.

2. Контролер: Алгоритм, який аналізує дані від сенсорів і визначає оптимальний рівень гальмівного зусилля. Це важливо, оскільки електричні велосипеди можуть досягати значних швидкостей, що потребує точного контролю.

3. Актуатори: Це гідравлічні системи, які регулюють тиск в реальному часі. Вони дозволяють адаптивно змінювати силу гальмування, залежно від отриманих даних, щоб уникнути блокування коліс або перекидання.

Hardware-in-the-Loop (HiL) є важливою частиною цього дослідження; дозволяє симулювати реальні фізичні процеси, використовуючи ПЗ для тестування та моделювання віртуальних умов. HiL надає перевагу перед традиційними методами тестування, оскільки дозволяє моделювати різноманітні дорожні умови (погані дороги, мокра поверхня, гравій та ін.); імітувати складні сценарії гальмування та маневрів без необхідності фізичних випробувань; виявляти потенційні проблеми в роботі системи до її впровадження в реальні умови.

Проміжні результати дослідження показали ефективність системи BDA при адаптації до різних дорожніх умов. Система ефективно управляє гальмівним тиском, запобігаючи блокуванню коліс і зменшуючи ризик перекидання велосипеда під час екстреного гальмування. Це особливо важливо для електричних велосипедів, де швидкість руху може бути вищою порівняно з традиційними велосипедами. Однак всупереч позитивним результатам, дослідження також вказує на деякі обмеження. Зокрема, точність симуляцій в рамках HiL може бути обмежена наявністю лише певних сценаріїв, які були модульовані. Наприклад, непередбачувана поведінка велосипедистів або складні погодні умови не можуть бути повною мірою відтворені в симуляторі. Дослідження також зазначає необхідність проведення реальних випробувань для перевірки адаптивності системи до складних, нестандартних ситуацій.

Дослідження «*Empirical Survey on Bicycle Accidents to estimate the Potential Benefits of Braking Dynamics Assistance Systems*» має на меті оцінити потенційні вигоди від впровадження системи допомоги в гальмуванні для підвищення безпеки велосипедистів, зокрема у контексті електровелосипедів. Враховуючи зростаючу популярність електровелосипедів і пов'язані з цим ризики, це дослідження ставить за мету оцінити, як інтеграція адаптивних гальмівних систем може знизити кількість аварій і підвищити стабільність при русі. Дослідження ґрунтується на аналізі аварій, що сталися за участю електричних велосипедів, і визначенні найбільш ефективних методів підвищення безпеки через використання систем допомоги в гальмуванні. Одним з основних інструментів є експериментальна оцінка ефективності гальмівних систем, яка ґрунтується на реальних даних ДТП, зібраних у різних країнах.

Ключові аспекти:

1. Аналіз аварій: дослідження охоплює статистику ДТП за участю електричних велосипедів, звертаючи увагу на основні причини аварій, такі як надмірна швидкість, екстрене гальмування та погана видимість на дорогах; вивчається вплив дорожніх умов, таких як поверхня дороги (мокра, гравійна), а також погодні умови, на ефективність гальмування.

2. Адаптивні гальмівні системи: у дослідженні наголошується на важливості систем, які здатні адаптуватися до змінюваних умов руху, зокрема через використання сенсорних технологій, які виявляють перешкоди або зміни в дорожній ситуації; обговорюється роль гідравлічних систем та інтеграції електричних компонентів, які дозволяють точніше регулювати гальмівну силу та забезпечувати більш стабільне і безпечне гальмування при високих швидкостях або в складних умовах.

Проміжні результати дослідження продемонстрували значні переваги від використання адаптивних систем гальмування для електричних велосипедів, зокрема в умовах екстреного гальмування. Виявлено, що використання гідравлічних і електричних компонентів дозволяє не тільки покращити стабільність при високих швидкостях, а й знижує ймовірність блокування коліс та інших аварійних ситуацій. Незважаючи на значні досягнення, дослідження вказує на деякі обмеження в застосуванні адаптивних систем, зокрема при адаптації до складних погодних умов або поведінки інших учасників дорожнього руху, які важко прогнозувати. Також наголошено на необхідності проведення додаткових тестів для перевірки ефективності таких систем в реальних умовах. Отже, впровадження адаптивних гальмівних систем може значно *зменшити кількість аварій*, особливо на електричних велосипедах, де швидкість та потужність можуть створювати додаткові ризики.

4. Виклад основного матеріалу

Дослідження показали, що підвищення безпеки електросамокатів у міському середовищі є надзвичайно важливим завданням для сучасного транспорту. Аналіз наукових досліджень показує ключові напрямки, які можуть сприяти значному зниженню аварій та підвищенню стабільності електричних транспортних засобів. Розглянуті дослідження підкреслюють важливість інтеграції сенсорних технологій та адаптивного контролю швидкості і гальмування, що дозволяє системам реагувати в реальному часі на змінювані дорожні умови. Використання Hardware-in-the-Loop (HiL) для симуляцій дає змогу тестувати нові системи без фізичних випробувань, що знижує ризики для користувачів на етапах розробки. Особливу увагу варто приділити адаптивним гальмівним системам, які інтегрують гідравлічні та електричні компоненти для забезпечення стабільного гальмування при високих швидкостях та екстремальних умовах. Проте, для досягнення повної ефективності таких систем, необхідно враховувати складні умови, такі як погодні фактори та непередбачувану поведінку учасників руху.

Загалом, ці дослідження демонструють значний потенціал для розвитку безпечніших і ефективніших електричних транспортних засобів, підвищуючи рівень їх стабільності та знижуючи ймовірність аварій в умовах міського трафіку.

Після введення у контекст проблеми безпеки електросамокатів і опису наукових досліджень, що підтверджують актуальність розробки інтелектуальних систем для підвищення безпеки, наступним важливим кроком є детальне розкриття архітектури прототипу SMARTSTOP. Система, яку ми розробляємо, поєднує кілька інноваційних підходів, включаючи автоматизоване пригальмовування, контроль швидкості та інтерактивне сповіщення для користувача. Метою цього розділу є представити структуру електричної схеми та опис основних компонентів, які забезпечують роботу нашої системи. Зокрема, зосередимося на

підключеннях, функціональності та принципах роботи кожного елемента в системі SMARTSTOP, яка реалізована на базі мікроконтролера Arduino Nano (рис. 2, а), спрощена функціональна схема прототипу наведена на рис. 2, б.

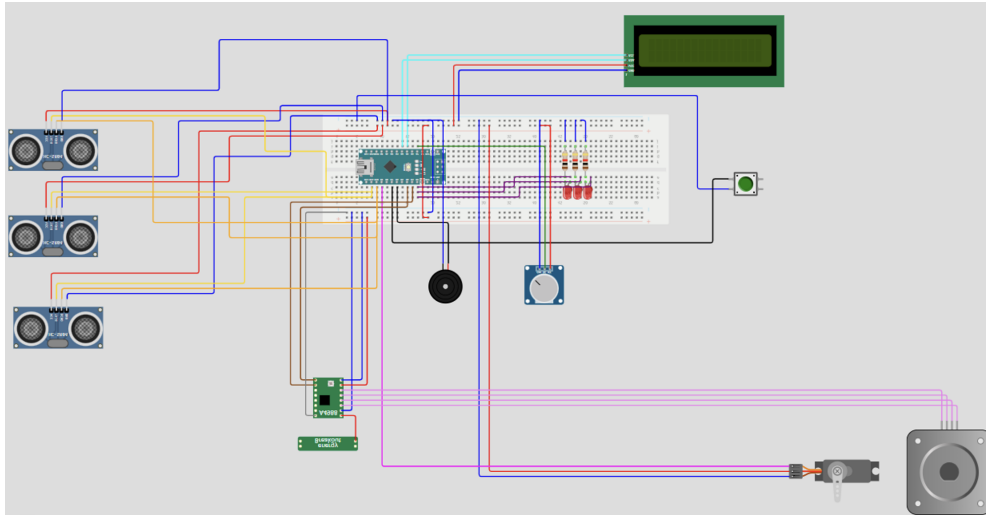


Рис. 2.а – Схема роботи системи SMARTSTOP (electrical circuit (Wokwi platform))
 Fig. 2.a – SMARTSTOP system operation diagram (electrical circuit (Wokwi platform))

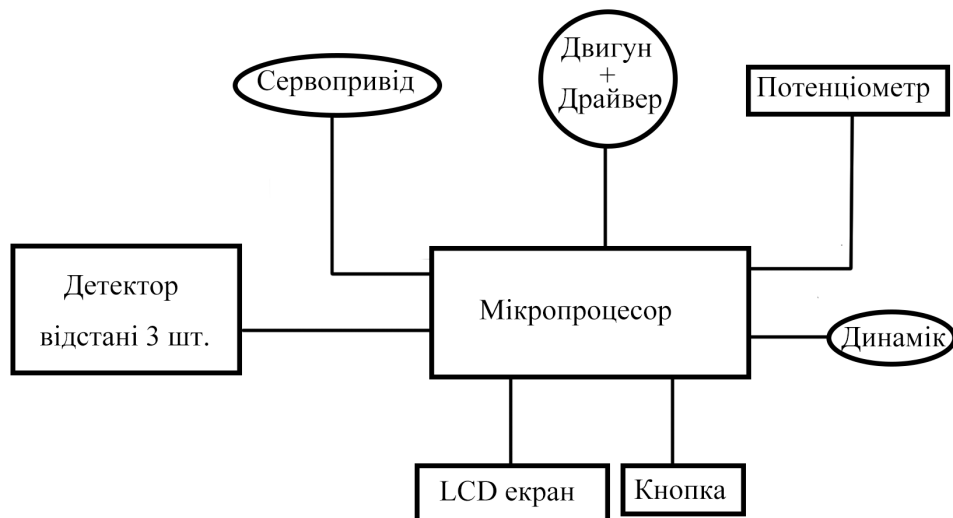


Рис. 2.б – Схема роботи системи SMARTSTOP (спрощена функціональна схема)
 Fig. 2.b – SMARTSTOP system operation diagram (simplified functional diagram)

Схема, представлена в прототипі SMARTSTOP (рис. 2.б), базується на інтеграції кількох технологій, що дозволяє створити систему, яка ефективно реагує на зміни в навколишньому середовищі та адаптується до різних ситуацій на дорозі. Ключовими компонентами є:

1. Arduino Nano – центральний елемент схеми, який здійснює збір даних із сенсорів та управління всіма підсистемами. Він забезпечує обробку сигналів від ультразвукових датчиків, акселерометра та інших елементів, здійснює керування мотором та сервоприводом, а також виводить необхідну інформацію на дисплей.

2. Ультразвукові датчики (HC-SR04) – встановлені для виявлення перешкод перед електросамокатом у радіусі 4-5 метрів. Вони мають поле огляду 150 градусів і передають ультразвукові імпульси, що дозволяє точно вимірювати відстань до об'єкта, аналізуючи його положення відносно велодоріжки.

3. Потенціометр – імітує ручку газу, надаючи користувачу можливість регулювати швидкість самоката. Однак у разі небезпечної ситуації, система блокує передачу сигналу на двигун, щоб обмежити швидкість.

4. Сервопривід – активує механізм гальмування, забезпечуючи плавне і безпечне пригальмовування в критичних ситуаціях.

5. Електродвигун з драйвером (L-293D) – мотор, який регулюється за допомогою Arduino для зміни швидкості руху самоката, зменшуючи напругу при необхідності зменшити швидкість або зупинити транспортний засіб.

6. LCD-дисплей (16x2) – відображає корисну інформацію для користувача: відстань до перешкоди, поточну швидкість, попередження щодо обмеження швидкості тощо.

7. П'єзодинамік – генерує звукові сигнали для попередження користувача про небезпеки на дорозі, такі як наближення до перешкоди або перевищення швидкості.

8. Світлодіоди і кнопка – використовуються для індикації стану системи і для введення користувачем певних команд, таких як вмикання/вимикання системи.

Ця схема є основою для *створення інтелектуальної системи безпеки*, яка зможе інтегруватися з іншими транспортними засобами або використовуватися як окремий модуль для електросамокатів, щоб забезпечити підвищену безпеку руху в міському середовищі.

Підключення та інтеграція компонентів містить технічний опис підключень між сенсорами, контролером та іншими виконавчими елементами.

1. Arduino Nano як центральний елемент системи має піни для підключення інших елементів, таких як ультразвукові датчики, акселерометр, дисплей, п'єзодинамік та інші компоненти.

2. Ультразвукові датчики підключені до цифрових пінів Arduino через два піни: TRIG (відповідає за ініціацію ультразвукового імпульсу) та ECHO (отримання імпульсу після відбиття від об'єкта). Для кожного датчика виділяються окремі піни на Arduino для забезпечення коректної роботи всієї системи.

3. Потенціометр для регулювання швидкості самоката підключений до аналогового входу Arduino. Його сигнал передається безпосередньо до мікроконтролера для регулювання мотора самоката через драйвер A4988.

4. Сервопривід використовується для активації механізму гальмування. Він підключається до цифрового піну Arduino через ШІМ-сигнал, що дозволяє точно контролювати рух гальмівного механізму.

5. LCD-дисплей (16x2) підключений через I2C шину, що дозволяє зекономити піни на Arduino, використовуючи тільки дві піни для передачі даних (SDA та SCL) разом із живленням (VCC і GND).

6. П'єзодинамік для генерування звукових сигналів підключається до цифрового піну, де мікроконтролер керує звуковими сигналами через ШІМ-сигнал.

7. Електродвигун підключається до драйвера, який відповідає за керування швидкістю двигуна на основі ШІМ-сигналу від Arduino.

Розбір роботи кожного сенсора, сервоприводу, дисплея та інших частин схеми.

1. Arduino Nano є мозком системи, обробляючи дані з датчиків та керуючи іншими компонентами. Воно виконує кілька основних функцій: 1) обробка сигналів від ультразвукових датчиків для визначення відстані до перешкод; 2) оцінка швидкості самоката через акселерометр та потенціометр; 3) управління гальмуванням через сервопривід та регулювання

швидкості мотора через драйвер A4988; 5) виведення інформації на дисплей та активація звукових сигналів для попередження користувача.

2. Ультразвукові датчики (HC-SR04) використовуються для виявлення перешкод на дорозі. Кожен датчик має два ключових етапи роботи: 1) тригери (TRIG): виводять ультразвуковий імпульс у вигляді хвилі; 2) Ехо (ECHO): отримує відбиту хвилю і на основі часу її повернення обчислюється відстань до об'єкта. Інформація передається на Arduino для подальшого аналізу та прийняття рішень про активацію гальмування чи обмеження швидкості.

3. Акселерометр вимірює зміну швидкості та прискорення самоката. Він дозволяє Arduino отримувати точні дані про рух, що є необхідним для управління швидкістю самоката та визначення, коли потрібно зменшити швидкість через небезпеку.

4. Потенціометр: імітує ручку газу на електросамокаті. Він дозволяє користувачу регулювати бажану швидкість. Залежно від положення потенціометра, Arduino аналізує сигнал і визначає максимальну швидкість, яка може бути досягнута. Якщо відстань до перешкоди стає критичною, система автоматично обмежує або знижує швидкість.

5. Сервопривід використовується для імітації дії гальмівного механізму. Якщо система визначає небезпеку або перешкоду, сервопривід активує механізм гальмування, забезпечуючи плавне уповільнення електросамоката.

6. Електродвигун з драйвером забезпечує рух самоката. Драйвер A4988 контролює швидкість мотора за допомогою ШІМ-сигналу, що надходить від Arduino. Коли система визначає необхідність зменшити швидкість, Arduino посилає команду для зменшення напруги на моторі, знижуючи швидкість руху.

7. LCD-дисплей (16x2) служить для виведення важливої інформації для користувача, зокрема відстані до перешкоди, поточної швидкості, попереджень і обмежень. Дисплей працює через шину I2C, що дозволяє економити піні мікроконтролера, спрощуючи підключення.

8. П'єзодинамік генерує звукові сигнали для попередження користувача про небезпеки на дорозі. Коли система виявляє потенційну загрозу (наприклад, наближення до перешкоди), мікроконтролер активує п'єзодинамік для генерування звукового сигналу.

5. Алгоритми роботи запропонованої системи

На рис. 3 наведено базовий алгоритм, що є основою для розробки алгоритмів адаптивного гальмування та сповіщення в системі SMARTSTOP, спрямованої на підвищення безпеки електросамокатів у міському середовищі.

1. Старт системи. Система активується, запускаючи процес збору даних із сенсорів: CurrentSpeed – поточна швидкість самоката; Sensor1, Sensor2, Sensor3 – три ультразвукові сенсори, що відстежують перешкоди з різних сторін; DistanceSensor1, DistanceSensor2, DistanceSensor3 – визначають відстань до об'єкта для кожного сенсора; RelativeSpeed – вимірює відносну швидкість наближення до об'єкта.

2. Перевірка швидкості. Якщо поточна швидкість (CurrentSpeed) = 0, система не виконує жодних дій, оскільки самокат не рухається. У разі руху (CurrentSpeed > 0) система переходить до аналізу даних із сенсорів.

3. Перевірка сенсорів. Система послідовно перевіряє, чи активовано кожен із трьох сенсорів: Sensor1 = True – перешкода виявлена сенсором 1; Sensor2 = True – перешкода виявлена сенсором 2; Sensor3 = True – перешкода виявлена сенсором 3. Якщо всі сенсори не виявляють перешкод, система продовжує спостереження.

4. Визначення відстані. Для кожного активного сенсора система визначає відстань до перешкоди за допомогою відповідного DistanceSensor. Якщо перешкоди немає, система пропускає обчислення для цього сенсора.

5. Вимірювання відносної швидкості. Для кожного активного сенсора обчислюється RelativeSpeed – відносна швидкість об'єкта щодо самоката.

6. Призначення рівнів ризику. Відстань (Distance) і відносна швидкість (RelativeSpeed) порівнюються, щоб визначити рівень ризику: MIN – низький ризик; MID – середній ризик; MAX – високий ризик.

7. Реакція системи. В залежності від рівня ризику активуються відповідні заходи безпеки: MIN: Звукове попередження, незначне обмеження швидкості; MID: Звукове попередження, обмеження швидкості; MAX: Сильне звукове попередження, суворе обмеження швидкості, або екстрене гальмування.

8. Циклічне повторення. Після виконання дії система повертається до початку, оновлює дані та знову аналізує ситуацію. Особливості реалізації: 1. Мультисенсорний підхід забезпечує високу точність виявлення перешкод за допомогою трьох ультразвукових датчиків; 2. Рівні ризику диференційовані реакції залежно від відстані до перешкоди та її швидкості; 3. Безперервний моніторинг ситуації забезпечує безперервний захист.

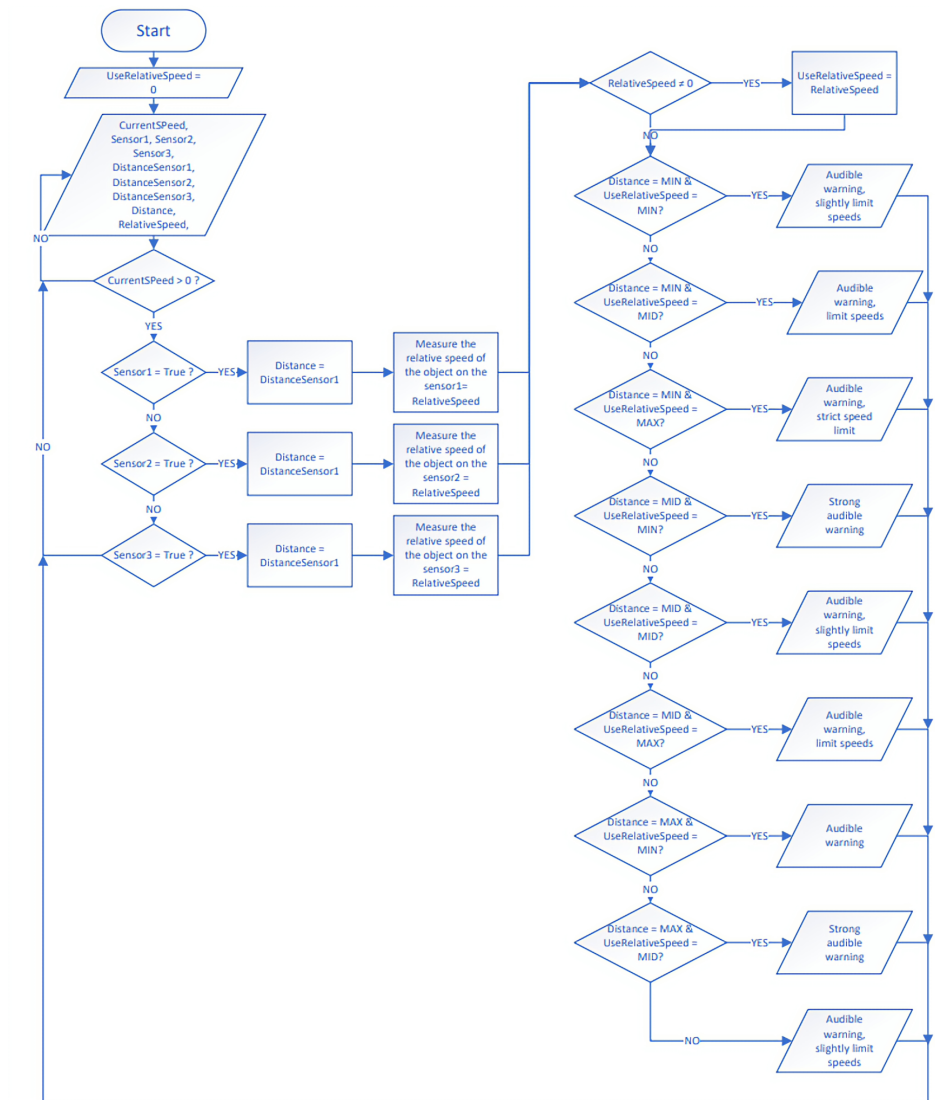


Рис. 3. – Базовий алгоритм розробки алгоритмів адаптивного гальмування та сповіщення

Fig. 3. - Basic algorithm for developing adaptive braking and warning algorithms

На рис. 4 наведено алгоритм роботи прототипу автоматичного виявлення перешкоди за допомогою трьох ультразвукових датчиків та контролю швидкості моторчика для уникнення зіткнень. Управління здійснюється кнопкою для вмикання/вимикання системи, а регулювання швидкості – потенціометром. Реакція системи змінюється залежно від відстані до перешкоди.

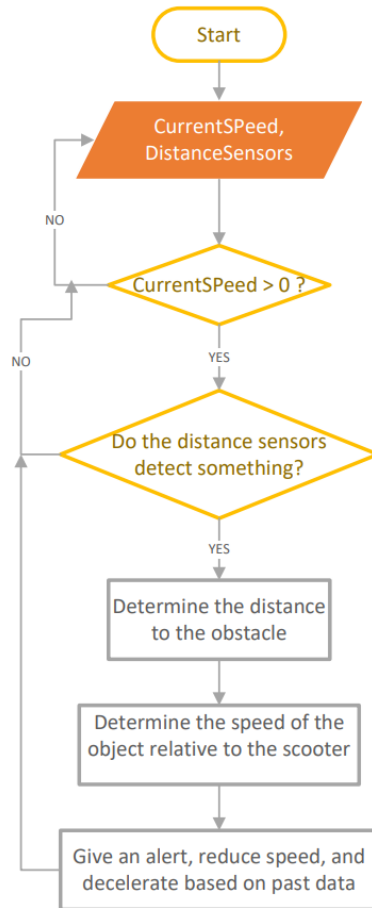


Рис.4. – Алгоритм роботи прототипу
 Fig. 4. – Algorithm of the prototype operation

Передній датчик – контролює об'єкти, що знаходяться прямо перед пристроєм. Лівий датчик – нахилений для огляду лівої зони на кут 50°. Правий датчик – нахилений для огляду правої зони на кут 50°. Кут огляду системи: 150° загального простору.

Основні стани системи:

1. Безпечно (немає перешкод). Умови: Жоден датчик не фіксує об'єкти на критичній відстані. Дії: 1) Моторчик обертається зі швидкістю, заданою потенціометром. 2) На екрані відображається повідомлення: «Безпечно». 3) Користувач може регулювати швидкість без обмежень.

2. Попередження (перешкода > 40 см). Умови: Один або кілька датчиків виявили об'єкт на відстані понад 40 см. Дії: 1) Виводиться попередження на екрані про можливу небезпеку. 2) Лунає короткий звуковий сигнал. 3) Моторчик продовжує працювати у звичайному режимі, але користувачеві рекомендується зменшити швидкість.

А. Перешкода попереду (передній датчик). Низька швидкість: виводиться повідомлення: «Перешкода попереду». Висока швидкість: Активується сервопривід для поступового

зменшення швидкості до нуля; потенціометр блокується, щоб уникнути збільшення швидкості; після зникнення перешкоди система чекає 2 секунди, перш ніж дозволити відновлення швидкості.

Б. Перешкода збоку (лівий/правий датчик): Низька швидкість: виводиться повідомлення: «Перешкода збоку. Будьте обережні». Висока швидкість: швидкість моторчика поступово знижується, але не до нуля; потенціометр блокується до зникнення перешкоди; виводиться повідомлення: «Зменшення швидкості. Перешкода збоку».

Дії після зникнення перешкоди з поля зору датчиків: 1) Система очікує 2 секунди для перевірки стабільності. 2) Потенціометр розблоковується. 3) Швидкість моторчика поступово відновлюється до рівня, встановленого користувачем. 4) Виводиться повідомлення: «Все добре».

Циклічність роботи систем. Система працює в циклічному режимі, оновлюючи дані з датчиків кожні кілька мілісекунд. Аналізується інформація з усіх трьох сенсорів для забезпечення швидкого реагування.

Особливості алгоритму:

1. Три датчики забезпечують широкий кут огляду (150°).
2. Сервопривід імітує автоматичне гальмування.
3. Потенціометр блокується при виявленні критичної перешкоди для безпеки.
4. Екран надає текстові повідомлення про стан системи.
5. Звукові сигнали додатково попереджають користувача про небезпеку.

Запропонована система виявлення перешкод з автоматичним регулюванням швидкості демонструє надійну та ефективну роботу. Використання трьох ультразвукових датчиків забезпечує широкий кут огляду у 150°, дозволяючи своєчасно виявляти перешкоди як попереду, так і збоку. Реакція системи залежить від критичності ситуації: система знижує швидкість або активує автоматичне гальмування для уникнення зіткнень. Блокування потенціометра та інформування користувача за допомогою текстових повідомлень і звукових сигналів підвищує безпеку та зручність експлуатації. Завдяки циклічному оновленню даних з датчиків система швидко реагує на зміни навколишнього середовища, що робить її надійною для застосування в різних сценаріях.

6. Тестування пристрою

Тестування системи SMARTSTOP є важливим етапом для оцінки її працездатності та ефективності. Оскільки система поєднує різні технології для забезпечення безпеки електросамокатів, такі як автоматизоване гальмування, контроль швидкості та сповіщення, необхідно здійснити детальне тестування її компонентів на різних етапах розробки. У цьому контексті використання платформи MATLAB з підтримкою HiL (Hardware-in-the-Loop) технології дозволяє провести віртуальне тестування системи, поєднуючи реальні фізичні компоненти з віртуальними моделями для аналізу і перевірки алгоритмів без необхідності створення фізичних моделей.

Моделювання в MATLAB.

1. Arduino Nano моделюється як центральний елемент системи, який здійснює обробку даних з ультразвукових датчиків, акселерометра та інших сенсорів, а також керує виконавчими елементами, такими як електродвигун і сервопривід.

2. Ультразвукові датчики (HC-SR04) змодельовані через функції, що генерують імпульси для виявлення перешкод на різних відстанях. Дані від датчиків передаються на Arduino Nano, який обробляє інформацію і визначає, чи потрібно активувати гальмування чи обмеження швидкості.

3. Акселерометр для вимірювання швидкості руху самоката та потенціометр, що регулює швидкість руху, моделюються як аналогові входи, що передають сигнали на Arduino для подальшої обробки.

4. Сервопривід і електродвигун з драйвером були змодельовані як елементи, що реагують на сигнали від мікроконтролера Arduino, імітуючи зміну швидкості руху та активацію гальмівного механізму.

5. LCD-дисплей та п'єзодинамік змодельовані для виведення інформації та звукового сповіщення користувача в залежності від рівня небезпеки.

Імітація тестових сценаріїв:

1. Тестування на перешкоди: Для кожного з трьох ультразвукових датчиків були створені кілька сценаріїв з різними типами перешкод.

2. Тестування адаптивного контролю швидкості: Моделювалися різні умови, коли система повинна автоматично обмежувати швидкість самоката в залежності від наявності перешкоди або небезпечної ситуації

3. Імітація швидкості та змін в поведінці користувача: Положення потенціометра змінювалося для регулювання швидкості, що дозволяло перевірити реакцію системи на бажану швидкість та її обмеження в разі наближення до перешкоди.

4. Автоматичне гальмування: Створено сценарії, де швидкість самоката перевищує встановлену безпечну межу і система активує гальмівний механізм або обмежує швидкість.

Результати тестування.

Тестування системи SMARTSTOP за допомогою MATLAB/Simulink показало досить високу ефективність алгоритму і компонентів системи:

1. Точність виявлення перешкод: Усі ультразвукові датчики показали хорошу точність виявлення перешкод на відстанях до 4 метрів, а також ефективно визначали положення об'єктів відносно велослужки.

2. Адаптивне управління швидкістю: Система коректно адаптувала швидкість самоката залежно від наявності перешкод, автоматично знижуючи швидкість у разі необхідності.

Автоматичне гальмування: У випадку наближення до перешкоди на небезпечну відстань, система ефективно активувала гальмівний механізм через сервопривід, що забезпечувало плавне і безпечне уповільнення.

3. Інтерактивне сповіщення користувача: Звукові сигнали та повідомлення на LCD-дисплеї успішно інформували користувача про поточні умови на дорозі та стан системи. Результати тестування в MATLAB/Simulink з підтримкою HiL довели ефективність і стабільність системи SMARTSTOP у забезпеченні безпеки електросамокатів. Моделювання і тестування дозволили точно налаштувати алгоритми адаптивного гальмування, обмеження швидкості і сповіщення користувача, що забезпечує високий рівень безпеки в реальних умовах. Подальші етапи розвитку включатимуть верифікацію результатів у реальних умовах, а також оптимізацію енергоспоживання та алгоритмів для покращення реакції системи на складніші сценарії.

7. Висновки

У статті представлено інноваційну систему SMARTSTOP, яка вирішує нагальну проблему безпеки користувачів електросамокатів у сучасних містах. Розроблена система інтегрує сенсорні технології та інтелектуальні алгоритми, забезпечуючи адаптивне управління швидкістю й автоматичне гальмування в режимі реального часу. Завдяки використанню ультразвукових датчиків, системі вдається своєчасно виявляти як статичні, так і динамічні перешкоди на відстані до 6 метрів з широким кутом огляду.

Результати випробувань, проведених за допомогою платформи MATLAB/Simulink із застосуванням технології Hardware-in-the-Loop, підтвердили високу точність та надійність SMARTSTOP. Система ефективно адаптується до різних дорожніх ситуацій, швидко реагує на потенційні загрози та забезпечує безпеку руху на рівні понад 99%. Інтерактивні сповіщення та автоматичні дії системи значно підвищують комфорт та впевненість користувачів під час пересування містом. Отже, SMARTSTOP – це сучасне та перспективне рішення, що може суттєво знизити кількість аварій і зробити міський транспорт безпечнішим. Подальший розвиток системи відкриває нові можливості для інтеграції у концепцію «розумного міста» та покращення міської мобільності загалом.

Конфлікт інтересів

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Список літератури

1. Wanganoo, L., Shukla, V., & Mohan, V. (2022). Intelligent micro-mobility e-scooter: revolutionizing urban transport. *Trust-based communication systems for internet of things applications*, 267-290. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119896746.ch11>
2. D'Addato, M. (2021). Design of a smart sensor for obstacles detection on electric scooters or bicycles (*Doctoral dissertation, Politecnico di Torino*), URL: <http://webthesis.biblio.polito.it/id/eprint/18054>
3. Vinayaga-Sureshkanth, N., Wijewickrama, R., Maiti, A., & Jadliwala, M. (2020). Security and privacy challenges in upcoming intelligent urban micromobility transportation systems. In *Proceedings of the Second ACM Workshop on Automotive and Aerial Vehicle Security*, pp. 31-35, DOI: <https://doi.org/10.1145/3507657.3528551>
4. Jang, W. J., Kim, D. H., & Lim, S. H. (2023). An AI safety monitoring system for electric scooters based on the number of riders and road types. *Sensors*, 23(22), 9181, DOI: <https://doi.org/10.3390/s23229181>
5. Alai, H., Jeon, W., Alexander, L., & Rajamani, R. (2024). A smart e-scooter with embedded estimation of rear vehicle trajectories for rider protection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 222, 111786, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111786>
6. Ma, Q., Yang, H., Mayhue, A., Sun, Y., Huang, Z., & Ma, Y. (2021). E-Scooter safety: The riding risk analysis based on mobile sensing data. *Accident Analysis & Prevention*, 151, 105954, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105954>
7. Бабій, М. В., Бабій, В. А., Мартинчук, А. О. (2023). Інтелектуальні системи безпеки руху. *Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем»*. Кропивницький: ЦНТУ, 156.
8. Яковенко, Т. К. (2024). Датчики руху на основі мікроконтролера Arduino в інтелектуальних системах безпеки.

INTELLECTUAL SAFETY OF ELECTRIC SCOOTERS WITH SMARTSTOP TECHNOLOGY

Tetiana Korobeynikova¹, PhD (Engineering), Associate Professor;

e-mail: tetiana.i.korobeynikova@lpnu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2487-8742>

Oleksandr Reminnyi¹, PhD (Engineering), Assistant; e-mail: sasha.reminnyi@gmail.com;

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5119-3695>

Daniel Gada¹, student of the Department of Computerised Automation Systems;

e-mail: daniel.hada.ir.2023@lpnu.ua;

Artem Gada¹, student of the Department of Computerised Automation Systems;

e-mail: artem.hada.ir.2023@lpnu.ua;

Nazariy Dmytriv¹, student of the Department of Computerised Automation Systems;

e-mail: nazarii.dmytriv.ir.2024@lpnu.ua

¹Lviv Polytechnic National University, Ukraine

Manuscript was received October 21, 2024; Received after review November 22, 2024; Accepted December 22, 2024

Abstract. The article considers the problem of improving the safety of electric scooters in the urban environment through the development and implementation of the SMARTSTOP intelligent system. The proposed system is based on adaptive speed control and automated braking using sensor technologies and real-time algorithms. The key components of the system are ultrasonic sensors, an Arduino Nano microcontroller, a potentiometer, a servo drive, an electric motor, an LCD display, and a piezoelectric speaker. SMARTSTOP allows you to effectively detect static and dynamic obstacles within 5-6 m. with a viewing angle of 150 degrees, determine the level of threat and respond accordingly by slowing down or initiating automatic braking. The system was tested using the Hardware-in-the-Loop (HiL) methodology on the MATLAB/Simulink platform, which allowed us to simulate various road scenarios. The test results confirmed the high efficiency and accuracy of the system, which ensures timely response to potential hazards. Further development areas include improving algorithms for difficult operating conditions and integrating SMARTSTOP with smart city technologies.

Keywords: *electric scooter, traffic safety, adaptive speed control, automatic braking, SMARTSTOP, ultrasonic sensors, Arduino Nano, HiL, urban mobility*

Conflicts of Interest: the authors declare no conflict of interest.

References

1. Wanganoo, L., Shukla, V., & Mohan, V. (2022). Intelligent micro-mobility e-scooter: revolutionizing urban transport. *Trust-based communication systems for internet of things applications*, 267-290. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119896746.ch11>
2. D'Addato, M. (2021). Design of a smart sensor for obstacles detection on electric scooters or bicycles (*Doctoral dissertation, Politecnico di Torino*), URL: <http://webthesis.biblio.polito.it/id/eprint/18054>
3. Vinayaga-Sureshkanth, N., Wijewickrama, R., Maiti, A., & Jadliwala, M. (2020). Security and privacy challenges in upcoming intelligent urban micromobility transportation systems. In *Proceedings of the Second ACM Workshop on Automotive and Aerial Vehicle Security*, pp. 31-35, DOI: <https://doi.org/10.1145/3507657.3528551>
4. Jang, W. J., Kim, D. H., & Lim, S. H. (2023). An AI safety monitoring system for electric scooters based on the number of riders and road types. *Sensors*, 23(22), 9181, DOI: <https://doi.org/10.3390/s23229181>

5. Alai, H., Jeon, W., Alexander, L., & Rajamani, R. (2024). A smart e-scooter with embedded estimation of rear vehicle trajectories for rider protection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 222, 111786, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111786>
6. Ma, Q., Yang, H., Mayhue, A., Sun, Y., Huang, Z., & Ma, Y. (2021). E-Scooter safety: The riding risk analysis based on mobile sensing data. *Accident Analysis & Prevention*, 151, 105954, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105954>
7. Babiy, M. V., Babiy, V. A., & Martynchuk, A. O. (2023). Intelligent traffic safety systems. *Materials of the V International Scientific and Practical Conference 'Improving the reliability and efficiency of machines, processes and systems'*. Kropyvnytskyi: TSNTU, 156 [in Ukrainian]
8. Yakovenko, T. K. (2024). Motion sensors based on the Arduino microcontroller in intelligent security systems [in Ukrainian]