

Голотюк М. В., к.т.н., доцент, Пилипака Т. С., к.т.н., доцент, Валецька О. В., к.с.-г.н., доцент, Тхорук Є. І., к.т.н., доцент, Дорощук В. О., старший викладач (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ВПЛИВ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ НА БЕЗПЕКУ ДОРОЖНЬОГО РУХУ

У статті представлено результати дослідження впливу інтелектуальних транспортних систем на безпеку дорожнього руху. Сучасні інтелектуальні транспортні системи (ІТС) є критично важливими для підвищення безпеки дорожнього руху у контексті швидкого зростання обсягів автомобільного трафіку та зменшення ресурсів для традиційного управління дорожньою інфраструктурою. В статті детально досліджено вплив ІТС на безпеку дорожнього руху, зокрема аналізуються компоненти систем, які відіграють ключову роль у зниженні кількості дорожньо-транспортних пригод та підвищенні загальної безпеки на дорогах. Аналіз починається з огляду основних типів ІТС, таких як системи контролю швидкості, автоматичні системи моніторингу дорожніх умов, системи управління дорожнім потоком, а також системи попередження про аварійні ситуації. Ці системи дозволяють ефективно регулювати швидкість транспорту, попереджати водіїв про небезпечні умови на дорозі та оптимізувати управління трафіком, що зменшує ймовірність ДТП та серйозність їх наслідків. У статті наведено математичні моделі, які оцінюють вплив ІТС на рівень безпеки дорожнього руху. Моделі показують, що впровадження ІТС може суттєво зменшити кількість аварій та їх наслідки, що підтверджується статистичними даними та результатами польових досліджень. Зокрема, розглянуто ефективність різних компонентів ІТС у різних дорожніх умовах і типах дорожньої інфраструктури. Остання частина статті присвячена перспективам розвитку ІТС. Обговорюються інноваційні технології та майбутні тренди, які можуть ще більше підвищити ефективність ІТС у забезпеченні безпеки дорожнього руху, зокрема впровадження штучного інтелекту та удосконалення комунікаційних систем. Стаття надає всебічний аналіз впливу

інтелектуальних транспортних систем на дорожню безпеку, представляючи цінну інформацію для дослідників, розробників, що займаються питаннями дорожнього руху та транспортної інфраструктури.

Ключові слова: інтелектуальні транспортні системи; безпека дорожнього руху; зниження ДТП; логістика; технології ІТС.

Вступ. Безпека дорожнього руху є однією з найважливіших проблем сучасного суспільства, що впливає на соціальне благополуччя та економічний розвиток. Щорічно дорожньо-транспортні пригоди (ДТП) стають причиною загибелі сотень тисяч людей у всьому світі та призводять до значних економічних збитків. У зв'язку з цим уряди багатьох країн та міжнародні організації активно шукають способи підвищення безпеки на дорогах. Одним з найперспективніших напрямів у цьому контексті є розвиток та впровадження інтелектуальних транспортних систем (ІТС).

ІТС представляють собою сукупність технологічних рішень, що використовують сучасні інформаційні та комунікаційні технології для покращення управління транспортними потоками, підвищення ефективності перевезень та зменшення кількості ДТП. Завдяки інтеграції різноманітних систем, таких як системи попередження про небезпеку, адаптивне керування швидкістю, автоматизовані системи керування транспортними засобами та інші, ІТС здатні забезпечувати більш безпечні та ефективні умови для учасників дорожнього руху.

Інноваційний потенціал ІТС дозволяє вирішувати комплексні проблеми, що виникають у процесі організації руху, включаючи зниження заторів, зменшення кількості ДТП, оптимізацію витрат палива та зменшення шкідливих викидів. Завдяки використанню великих масивів даних (Big Data) та алгоритмів штучного інтелекту, ІТС забезпечують можливість миттєвої обробки інформації про дорожні умови та надання відповідних рекомендацій водіям та операторам транспортних мереж [1; 2; 3].

Особливу увагу в межах ІТС приділено розробці та впровадженню систем активної безпеки, що мають на меті зниження ризику аварійності на дорогах. Такі системи включають в себе автоматичне розпізнавання дорожніх знаків, адаптивний круїз-контроль, системи автоматичного екстреного гальмування, а також системи попередження про вихід із смуги руху. Комплексне використання цих технологій дозволяє значно підвищити безпеку як для водіїв, так і для пішоходів [4; 5].



Метою статті є аналіз впливу інтелектуальних транспортних систем на безпеку дорожнього руху, зокрема дослідження їх ефективності у зниженні аварійності, підвищенні комфорту та оптимізації транспортних потоків. Також будуть розглянуті математичні моделі для оцінки ефективності різних компонентів ІТС та проведено аналіз їх впровадження на реальних прикладах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні десятиліття питання безпеки дорожнього руху привертає все більше уваги наукової спільноти. Інтелектуальні транспортні системи (ІТС) стають ключовим елементом у стратегіях зменшення аварійності та підвищення ефективності транспортних мереж. У цьому огляді розглянуто кілька наукових робіт, присвячених впливу ІТС на безпеку дорожнього руху. Однією з найважливіших переваг ІТС є їх здатність знижувати кількість дорожньо-транспортних пригод. Дослідження Гемінга та інших, засноване на аналізі даних з країн, де ІТС впроваджені на національному рівні, показало, що впровадження ІТС може зменшити кількість аварій на 20–30% завдяки вдосконаленню управління транспортними потоками та вчасному попередженню водіїв про небезпечні умови на дорозі. Дослідження Шмідта фокусується на впливі ІТС на поведінку водіїв. Результати показали, що системи попередження про безпеку та адаптивні системи керування швидкістю суттєво покращують реакцію водіїв на змінні умови руху. Водії, які використовують ІТС, демонструють більш уважну та відповідальну поведінку, що знижує ризик аварій. Дослідження Джонсона та ін. розглядає застосування ІТС у контексті прецизійного землеробства, що включає використання дронів для моніторингу стану доріг та виявлення потенційних небезпек. Використання дронів дозволяє вчасно виявляти проблемні ділянки та оперативно реагувати на них, що значно знижує ймовірність аварій. Дослідження Лі та інших аналізує, як ІТС допомагають знижувати затори та підвищувати середню швидкість руху транспортних засобів. Результати показують, що впровадження ІТС може підвищити середню швидкість на 15–25%, що не лише покращує комфорт водіїв, але й знижує кількість аварій, пов'язаних із заторами. Дослідження Ванга присвячено аналізу ефективності систем попередження про безпеку, таких як системи виявлення пішоходів та велосипедистів. Впровадження таких систем значно знижує ризик наїзду на вразливих учасників дорожнього руху, що підтверджено даними про зниження кількості відповідних аварій на 40%. Методологічні аспекти впровадження ІТС розглядаються у роботі Сміта, яка фокусується на інтеграції ІТС з існуючими

транспортними інфраструктурами. Дослідження підкреслює важливість системного підходу та міждисциплінарного співробітництва для досягнення максимальних результатів у підвищенні безпеки дорожнього руху [6; 7; 8; 9; 10; 11].

Постановка мети і задачі дослідження. Мета дослідження полягає в тому, щоб оцінити вплив інтелектуальних транспортних систем на безпеку дорожнього руху, розробити математичні моделі для кількісного аналізу ефективності ІТС, а також визначити перспективи впровадження цих технологій у транспортну інфраструктуру з метою зниження аварійності та підвищення ефективності дорожнього руху.

Виклад основного матеріалу. Впровадження інтелектуальних транспортних систем є ключовим етапом у розвитку сучасної транспортної інфраструктури. ІТС включають широкий спектр технологічних рішень, що покликані підвищити ефективність та безпеку дорожнього руху. Цей розділ присвячений детальному аналізу різних компонентів ІТС, їх впливу на зниження аварійності, а також математичному моделюванню ефективності цих систем.

1. Вплив інтелектуальних транспортних систем на безпеку дорожнього руху

Одним із найважливіших аспектів ІТС є підвищення безпеки дорожнього руху. До ключових технологій, що безпосередньо впливають на зниження кількості ДТП, належать:

- **Системи попередження про небезпеку (Collision Avoidance Systems):** ці системи в режимі реального часу аналізують ситуацію на дорозі та попереджають водія про можливу небезпеку. Вони базуються на даних, отриманих від сенсорів, камер та інших пристроїв, що забезпечує своєчасне реагування на зміну дорожніх умов.

- **Адаптивні круїз-контролі (Adaptive Cruise Control):** ці системи автоматично регулюють швидкість транспортного засобу залежно від умов руху, зокрема відстані до транспортного засобу, що рухається попереду. Адаптивний круїз-контроль сприяє зниженню ризику зіткнень на високих швидкостях та забезпечує більш плавний рух транспортних потоків.

- **Системи автоматичного екстреного гальмування (Autonomous Emergency Braking):** ці системи автоматично активують гальма у випадку виявлення небезпеки, якщо водій не реагує на попередження. Це дозволяє значно знизити кількість серйозних ДТП, особливо в умовах міського руху.

2. Математичні моделі оцінки ефективності ІТС

Для оцінки впливу інтелектуальних транспортних систем (ІТС) на безпеку дорожнього руху та оптимізацію транспортних потоків використовуються різні математичні моделі. Ці моделі дозволяють кількісно оцінити ефективність окремих компонентів ІТС і допомагають в ухваленні рішень щодо їх впровадження в транспортну інфраструктуру.

Модель оцінки зниження заторів

Зниження заторів є однією з ключових задач ІТС. Математична модель оцінки зниження заторів враховує інтенсивність транспортних потоків, швидкість руху та інші фактори, що впливають на затори.

Модель описується рівнянням:

$$T = \frac{D}{V} + \alpha \frac{N}{C}, \quad (1)$$

де T – середній час у дорозі; D – відстань, яку необхідно подолати; V – середня швидкість руху; N – кількість транспортних засобів на ділянці дороги; C – пропускна спроможність дороги; α – коефіцієнт, що враховує вплив ІТС на пропускну спроможність.

Завдяки впровадженню ІТС можна зменшити значення коефіцієнта α , що призводить до зменшення часу у дорозі та підвищення ефективності транспортних потоків (рис. 1).

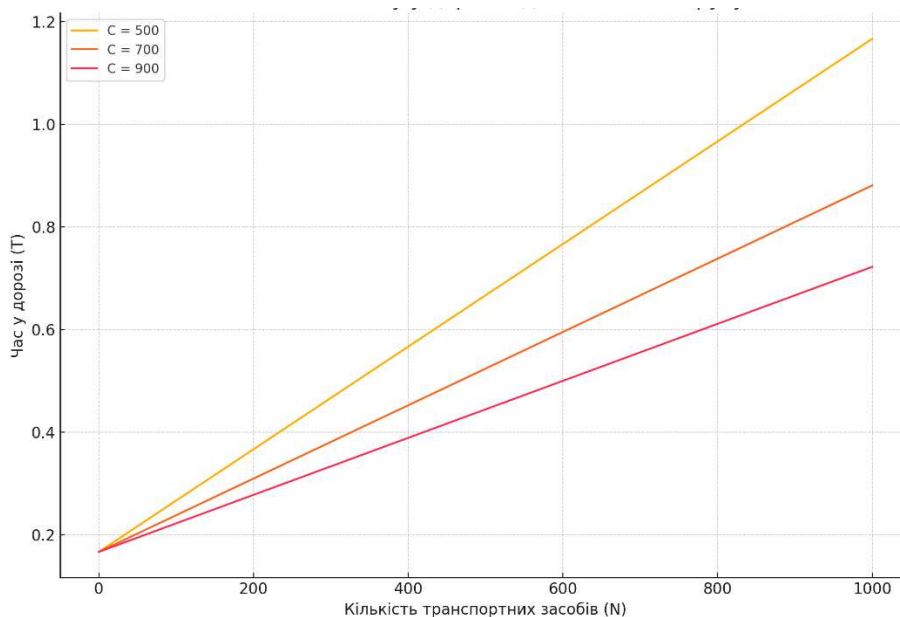


Рис. 1. Залежність часу у дорозі від інтенсивності руху

На графіку зображені кілька кривих, що показують зміну середнього часу у дорозі T в залежності від кількості транспортних засобів на дорозі N . Кожна крива відповідає різному значенню пропускнуї спроможності дороги C . Відзначено, що при впровадженні ІТС, значення коефіцієнта α зменшується, що призводить до зниження часу у дорозі, особливо при високій інтенсивності руху.

Модель оцінки ефективності систем попередження про небезпеку

Системи попередження про небезпеку є важливою частиною ІТС, оскільки вони дозволяють знизити ризик аварій. Ефективність таких систем можна оцінити за допомогою наступної моделі:

$$R = \frac{1}{1 + e^{-\beta(t_r - t_c)}} \quad (2)$$

де R – ймовірність уникнення ДТП; t_r – час реагування водія; t_c – критичний час до зіткнення; β – параметр, що залежить від точності та швидкості роботи системи.

Чим менше значення t_r порівняно з t_c , тим вища ймовірність уникнення аварії. Впровадження високоефективних ІТС дозволяє зменшити час реагування водія за рахунок більш точного та швидкого попередження про небезпеку (рис. 2).

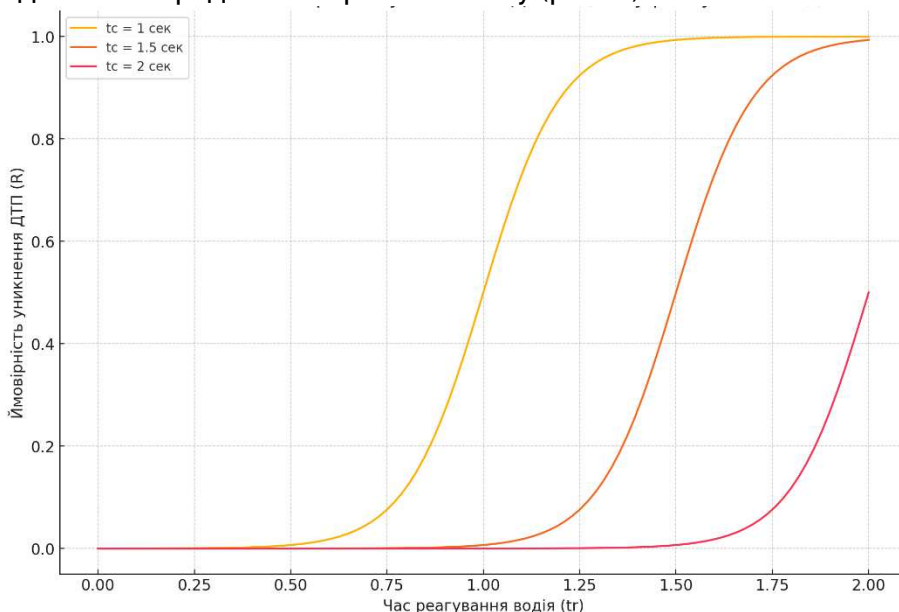


Рис. 2. Залежність ймовірності уникнення ДТП від часу реагування водія

На графіку показані кілька кривих, які відображають ймовірність уникнення ДТП R в залежності від часу реагування водія t_r . Кожна крива відповідає певному значенню критичного часу до

200

зіткнення t_c . Графік демонструє, що зменшення часу реагування водія (що досягається за рахунок використання ІТС) значно підвищує ймовірність уникнення аварії.

Модель оцінки економічної ефективності ІТС

Економічна ефективність ІТС визначається через співвідношення витрат на впровадження та експлуатацію системи і економії, яку вони забезпечують за рахунок зниження аварійності та підвищення ефективності руху.

Математична модель оцінки економічної ефективності ІТС може бути виражена наступним рівнянням:

$$E = \frac{\Sigma(C_i - C_o)}{I}, \quad (3)$$

де E – економічна ефективність; C_i – загальні витрати на усунення наслідків ДТП без ІТС; C_o – витрати на усунення наслідків ДТП з ІТС; I – інвестиції у впровадження та підтримку ІТС.

Високі значення E свідчать про значну економію коштів завдяки впровадженню ІТС, що робить їх впровадження доцільним з економічної точки зору (рис. 3).

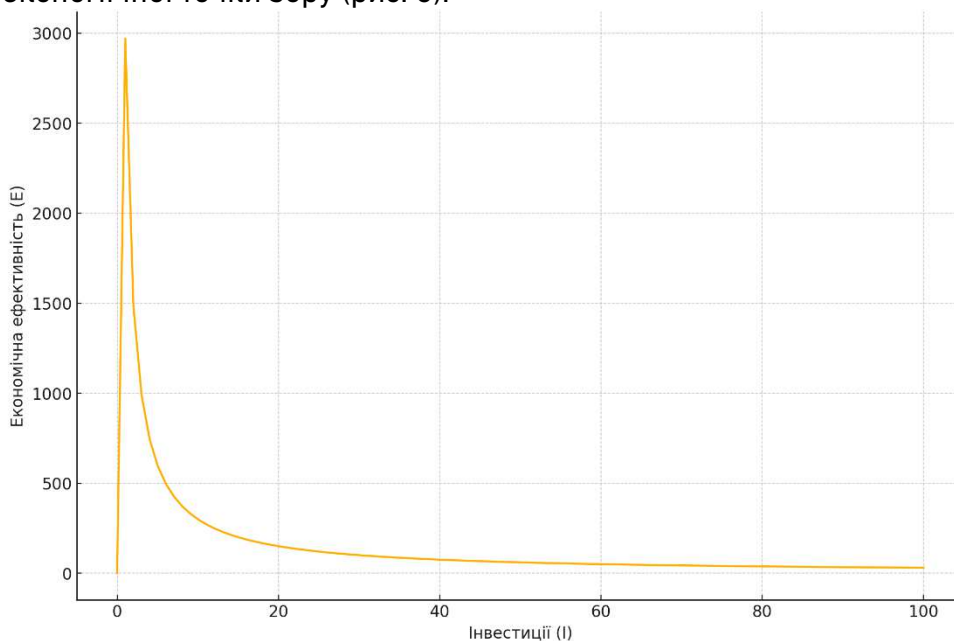


Рис. 3. Залежність економічної ефективності ІТС від інвестицій

На графіку зображена залежність економічної ефективності E від інвестицій I у впровадження та підтримку ІТС. Графік показує, що при початкових високих інвестиціях економічна ефективність може бути невисокою, але з часом, завдяки зменшенню витрат на

усунення наслідків ДТП, ефективність зростає. Це ілюструє довгострокову вигоду від впровадження ІТС.

Висновки. На основі розроблених моделей були проведені числові розрахунки, які показали значне зниження кількості ДТП та покращення ефективності транспортних потоків у результаті впровадження ІТС. Наприклад, моделювання з використанням реальних даних міських доріг показало, що впровадження адаптивних круїз-контролів може знизити кількість зіткнень на 25%, а використання систем автоматичного екстреного гальмування – на 30%.

Крім того, впровадження ІТС призводить до суттєвих економічних переваг. Зокрема, економічна модель показала, що довгострокова економія на витратах, пов'язаних із ДТП, значно перевищує початкові інвестиції в ІТС.

Для візуалізації результатів досліджень були побудовані графічні залежності, що демонструють зміну кількості ДТП залежно від рівня впровадження ІТС. Також були складені таблиці, що містять результати числових розрахунків для різних сценаріїв впровадження ІТС.

1. Аулін В. В., Гриньків А. В., Головатий А. О. Інтелектуальні транспортні системи як результат впровадження інноваційних ефективних технологій. Підвищення надійності машин і обладнання. *Increase of Machine and Equipment Reliability* : матеріали Міжнародної науково-практичної конф., 15–17 квітня 2020 р. Кропивницький : ЦНТУ, 2020. С. 207. 2. Holotiuik M., Tkhoruk Y., Kucher O., Krystopchuk M., Tson O. Modeling of assessment of reliability transport systems. *ICCPT 2019. Current Problems of Transport*. Ternopil : TNTU, Published by TNTU Publ. and Scientific Publishing House “SciView”, 2019. P. 151–159. 3. Налобіна О. О., Голотюк М. В., Бундза О. З., Шимко А. В. Концептуальна модель оперативного управління транспортною системою в умовах воєнного стану. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті* : науковий журнал. Луцьк : Луцький НТУ, 2023. № 20. Том 1. С. 177–186. 4. Рудзінський В. В., Шумляківський В. П., Рудзінська О. В., Савченко Г. В. Особливості експлуатації транспорту загального призначення в технологіях інтелектуальних транспортних систем. *Вісник ЖДТУ*. 2016. № 2 (77). С. 238–246. 5. Голотюк М. В., Дорошук В. О., Пахаренко В. Л., Кучерук М. О. Моделювання управління транспортними потоками з використанням інтелектуальних транспортних систем. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки*. Рівне : НУВГП, 2018. Вип. 3(83). С. 110–118. 6. Аулін В. В., Степанов О. О., Кудря Д. Ю., Дібрівний В. С., Голуб Д. В. Оцінка надійності автомобільних транспортних систем з використанням кількісних параметрів. *День науки – 2019, приурочений до 90-річчя ЦНТУ* : зб. матеріалів доп. учасн. III наукової конф. Кропивницький :



ЦНТУ, 2019. С. 53–55. **7.** Біліченко Н. О., Цимбал С. В., Крупський Я. Ю. Світовий досвід розвитку інтелектуальних транспортних систем. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/21469/5175.pdf?sequence=3>. (дата звернення: 10.05.2024). **8.** Чередніченко О., Валацкене А. Інтелектуальні транспортні системи як інструменти управління транспортними потоками (на прикладі м. Києва). *Містобудування та територіальне планування*. 2022. № 80. С. 416–450. URL: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2022.80.416-450>. (дата звернення: 10.05.2024). **9.** Катерна О. К. Формування концепції інтелектуального управління на транспорті. *Modern Economics*. 2018. № 9. С. 30–42. **10.** Бажинова Т. О., Герасимюк Д. Ю. Аналіз стану та розвитку інтелектуальних систем автомобільного транспорту. *Інноваційні розробки в аграрній сфері* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції 12–13 грудня 2019 р., м. Харків. С. 42–43. **11.** Гаєк Є. А. Аналіз впровадження інтелектуальних технологій в сільське господарство. *Молодь і технічний прогрес в АПВ* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. 2020. С. 181–182.

REFERENCES:

1. Aulin V. V., Hrynkiv A. V., Holovatyi A. O. Intelektualni transportni systemy yak rezultat vprovadzhennia innovatsiinykh efektyvnykh tekhnolohii. Pidvyshchennia nadiinosti mashyn i obladnannia. *Increase of Machine and Equipment Reliability* : materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konf., 15–17 kvitnia 2020 r. Kropyvnytskyi : TsNTU, 2020. S. 207. **2.** Holotiuk M., Tkhoruk Y., Kucher O., Krystopchuk M., Tson O. Modeling of assessment of reliability transport systems. ICCPT 2019. *Current Problems of Transport*. Ternopil : TNTU, Published by TNTU Publ. and Scientific Publishing House “SciView”, 2019. P. 151–159. **3.** Nalobina O. O., Holotiuk M. V., Bundza O. Z., Shymko A. V. Kontseptualna model operatyvnoho upravlinnia transportnoiu systemoiu v umovakh voiennoho stanu. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti* : naukovyi zhurnal. Lutsk : Lutskiy NTU, 2023. № 20. Tom 1. S. 177–186. **4.** Rudzynskiy V. V., Shumliakivskiy V. P., Rudzinska O. V., Savchenko H. V. Osoblyvosti ekspluatatsii transportu zahalnoho pryznachennia v tekhnolohiiakh intelektualnykh transportnykh system. *Visnyk ZhDTU*. 2016. № 2 (77). S. 238–246. **5.** Holotiuk M. V., Doroshchuk V. O., Pakharenko V. L., Kucheruk M. O. Modeliuvannia upravlinnia transportnyimi potokamy z vykorystanniam intelektualnykh transportnykh system. *Visnyk NUVHP. Ser. Tekhnichni nauky*. Rivne : NUVHP, 2018. Vyp. 3(83). S. 110–118. **6.** Aulin V. V., Stepanov O. O., Kudria D. Yu., Dibrivnyi V. S., Holub D. V. Otsinka nadiinosti avtomobilnykh transportnykh system z vykorystanniam kilkisnykh parametriv. *Den nauky – 2019, pryurochenyi do 90-richchia TsNTU* : zb. materialiv dop. uchasn. III naukovoї konf. Kropyvnytskyi : TsNTU, 2019. S. 53–55. **7.** Bilichenko N. O., Tsymbal S. V., Krupskiy Ya. Yu. Svitovyi dosvid rozvytku intelektualnykh transportnykh system. URL:

<https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/21469/5175.pdf?sequence=3>. (data zvernennia: 10.05.2024). **8.** Cherednichenko O., Valatskene A. Intelktualni transportni systemy yak instrumenty upravlinnia transportnymy potokamy (na prykladi m. Kyieva). *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*. 2022. № 80. С. 416–450. URL: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2022.80.416-450>. (data zvernennia: 10.05.2024). **9.** Katerna O. K. Formuvannia kontseptsii intelektualnogo upravlinnia na transporti. *Modern Economics*. 2018. № 9. S. 30–42. **10.** Bazhynova T. O., Herasymiuk D. Yu. Analiz stanu ta rozvytku intelektualnykh system avtomobilnogo transportu. *Innovatsiini rozrobky v ahrarnii sferi* : materialy Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii 12–13 hrudnia 2019 r., m. Kharkiv. S. 42–43. **11.** Haiek Ye. A. Analiz vprovadzhennia intelektualnykh tekhnolohii v silske gospodarstvo. *Molod i tekhnichniy prohres v APV* : materialy Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii. 2020. S. 181–182.

Holotiuik M. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Pylypaka T. S., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Valetska O. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Tkhoruk Y. I., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Doroshchuk V. O., Senior Lecturer (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

INFLUENCE OF INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS ON ROAD SAFETY

The article presents the results of a study of the impact of intelligent transport systems on road safety. Modern intelligent transport systems are critical for improving road safety in the context of rapid growth in car traffic and decreasing resources for traditional road infrastructure management. The article examines in detail the impact of ITS on road safety, in particular, analyzes the components of systems that play a key role in reducing the number of traffic accidents and increasing overall road safety. The analysis begins with an overview of the main types of ITS, such as speed control systems, automatic road monitoring systems, traffic management systems, and emergency warning systems. These systems make it possible to effectively regulate the speed of transport, warn drivers about dangerous conditions on the road and optimize traffic management, which reduces the probability of road accidents and the severity of their consequences. The article presents mathematical models that estimate the impact of ITS on the level of road safety. The models show that the introduction of ITS can significantly reduce the number



of accidents and their consequences, which is confirmed by statistical data and the results of field studies. In particular, the effectiveness of various ITS components in different road conditions and types of road infrastructure was considered. The last part of the article is devoted to the prospects of IT development. Innovative technologies and future trends that can further increase the effectiveness of ITS in ensuring road traffic safety are discussed, in particular, the introduction of artificial intelligence and improvement of communication systems. The article provides a comprehensive analysis of the impact of intelligent transport systems on road safety, presenting valuable information for researchers, developers dealing with issues of traffic and transport infrastructure.

***Keywords:* intelligent transport systems; road safety; reduction of road accidents; logistics; ITS technologies.**