

*О.В. СКЛЯРОВ, С.Г. СЕЛЕВИЧ*

## **ОГЛЯД СПОСОБІВ РЕГУЛЮВАННЯ РУХУ НА ПЕРЕХРЕСТЯХ ТА КЕРУВАННЯ ЦИКЛАМИ ПЕРЕМИКАННЯ СВІТЛОФОРІВ**

Проаналізовано технічні та організаційні рішення щодо улаштування різних типів перехресть; їх переваги і недоліки; доцільність використання різних типів та способів організації дорожнього руху за різних умов. Як результат складено порівняльну таблицю типів та способів регулювання. Практична значимість роботи полягає у наданні рекомендацій щодо актуальних технологій управління дорожнім рухом, перевагами та недоліками існуючих систем.

**Ключові слова:** перехрестя, світлофор, транспортні потоки, нерегульовані перехрестя, перехрестя з круговим регулюванням, перехрестя зі світлофорним регулюванням, фіксовані світлофори, адаптивні світлофори, статичні та динамічні цикли.

*О. SKLIAROV, S. SELEVYCH*

## **REVIEW OF METHODS FOR TRAFFIC CONTROL AT INTERSECTIONS AND TRAFFIC SIGNAL CYCLE MANAGEMENT**

This article discusses the regulation of traffic at intersections and evaluates different types of intersections such as signal-controlled, roundabouts, and uncontrolled intersections. Traffic regulation plays a crucial role in ensuring both safety and efficiency. Roundabouts, while reducing the number of conflict points and increasing traffic capacity, can be challenging for drivers unfamiliar with them and are less effective at high-traffic intersections. Uncontrolled intersections are cost-effective and simple but pose safety risks due to unclear traffic priorities and are unsuitable for high-traffic areas. Signal-controlled intersections, although more expensive to install and maintain, offer a high degree of flexibility and can efficiently handle heavy traffic while reducing the risk of accidents. The article further explores different types of traffic lights, including fixed, adaptive, and intelligent systems. Fixed traffic lights operate on predetermined cycles, offering simplicity but lacking adaptability. Adaptive traffic lights use real-time data to optimize traffic flow dynamically. Intelligent traffic lights integrate advanced technologies like AI and V2X communication to predict and manage traffic, improving safety and reducing emissions. However, they require significant infrastructure investment and data management. In conclusion, the choice of traffic regulation method depends on specific urban needs, with modern technologies offering enhanced safety and efficiency, though often at a higher implementation cost.

**Key words:** intersection, traffic signal, traffic flows, uncontrolled intersections, roundabout-controlled intersections, signal-controlled intersections, fixed traffic signals, adaptive traffic signals, static and dynamic cycles.

**Вступ.** Регулювання руху на перехрестях є одним із найважливіших аспектів організації дорожнього руху в міських умовах. Перехрестя, де сходяться транспортні потоки з різних напрямків, часто стають вузькими місцями в транспортній мережі, що може призвести до заторів, затримок, а також збільшення кількості дорожньо-транспортних пригод. Одним з основних способів забезпечення безпечного і безперервного руху є світлофорне регулювання, яке дозволяє координувати транспортні потоки та знижувати ризик конфліктних ситуацій. Удосконалення методів керування світлофорами, особливо налаштування їх циклів перемикання, є важливим завданням для підвищення ефективності дорожньої мережі. Оптимальні алгоритми перемикання можуть значно покращити пропускну здатність перехресть, зменшити час очікування для водіїв та знизити рівень забруднення повітря, що є актуальним в умовах зростання кількості транспортних засобів у містах. Метою цієї статті є огляд сучасних способів регулювання руху на перехрестях та методів керування циклами перемикання світлофорів. Розглянуто підходи до оптимізації світлофорного регулювання, зокрема традиційні фіксовані цикли, адаптивні системи та інтелектуальні технології, які використовують аналіз реального часу для підвищення ефективності управління транспортними потоками виявлені особливості, переваги та недоліки різних типів регулювання.

**Аналіз публікацій.** Дослідження систем регулювання дорожнього руху на перехрестях, зокрема через управління світлофорами, займає важливе місце у транспортних науках та інженерії. Основою нормативно-технічного регулювання в Україні є ДСТУ 4092-2002 «Світлофори дорожні», який встановлює загальні технічні вимоги, правила застосування та вимоги безпеки для світлофорних об'єктів. Цей стандарт [1, 2] надає ключові вказівки щодо встановлення світлофорів і управління рухом на перехрестях, забезпечуючи ефективну організацію транспортних потоків та безпеку учасників дорожнього руху. У своїх роботах Толок А.В. [4] детально аналізує основи світлофорного регулювання, розглядаючи важливі аспекти організації транспортних потоків та основи управління циклами перемикання світлофорів. Його лекційний курс містить важливу інформацію про принципи налаштування світлофорів залежно від інтенсивності руху. Науковці Є.Ю. Форнальчик, І.А. Могила та ін. [5] розглядають управління дорожнім рухом на регульованих перехрестях у містах, підкреслюючи важливість адаптивних систем регулювання, які дозволяють підвищити пропускну здатність перехресть. Їх дослідження акцентує увагу на необхідності розробки інтелектуальних систем керування світлофорами, що враховують динаміку зміни транспортних потоків в реальному часі. Значний вклад у розвиток методів розрахунку режимів світлофорного регулювання внесли Трушевський В.Е. та його колеги [6]. Вони пропонують методологію розрахунку режимів світлофорного регулювання з урахуванням емпіричних характеристик руху транспорту. Це дослідження демонструє практичний підхід до налаштування світлофорів, який базується на аналізі фактичної швидкості і потоків транспорту. Д.В. Руденко та І.М. Мартиняк [7] досліджують моделювання динаміки руху автомобілів через регульовані перехрестя, пропонуючи розробку моделей для прогнозування та оптимізації світлофорного регулювання. Вони підкреслюють важливість інтеграції світлофорних систем з сучасними інформаційно-комунікаційними технологіями для більш ефективного управління рухом. Міжнародні дослідження, зокрема Ghazal та ін. [8], розглядають можливості використання інтелектуальних систем для контролю світлофорів, акцентуючи увагу на системах, що базуються на аналізі реального часу. Інше важливе дослідження, проведене Wei та ін. [9], представляє методологію застосування підходу з підкріплювальним навчанням для оптимізації керування світлофорами, що підвищує ефективність і безпеку руху. Роботи таких авторів, як De Schutter і De Moor [10], досліджують методи оптимального управління світлофорами на окремих перехрестях, використовуючи математичні моделі для покращення розподілу транспортних потоків. Також інтерес становлять роботи з використання генетичних алгоритмів [11] та безпроводних сенсорних мереж [16] для адаптивного регулювання світлофорів. Таким чином, аналіз наукових праць показує, що регулювання за допомогою світлофорів є складною міждисциплінарною проблемою, яка потребує застосування сучасних технологій, математичних методів та адаптивних алгоритмів для підвищення ефективності управління дорожнім рухом на перехрестях.

**Способи та типи регулювання їх переваги та недоліки.** Для ефективного регулювання дорожнього руху на перехрестях важливо враховувати різноманітні кількісні та якісні показники, що дозволяють оптимізувати пропускну здатність і зменшити кількість дорожньо-транспортних пригод (ДТП). Залежно від типу перехресть (світлофорні, кругові, нерегульовані) та використовуваних методів регулювання, ці показники значно варіюються. Огляд кожного типу перехресть допомагає зрозуміти їхні переваги та недоліки, а також ефективність в управлінні транспортними потоками.

Перехрестя зі світлофорним регулюванням є найпоширенішими у великих містах. Основною перевагою таких перехресть є можливість чіткого розмежування транспортних потоків, що знижує кількість ДТП на 30-40% порівняно з нерегульованими перехрестями. Завдяки точному контролю за фазами світлофорів можна збільшити пропускну здатність на 20-25%, особливо на перехрестях із високою інтенсивністю руху. Час світлофорного циклу зазвичай варіюється від 60 до 120 секунд, що дозволяє ефективно керувати потоками

транспорту протягом дня. Однак, у періоди низької інтенсивності руху виникають певні затримки, які можуть збільшувати час очікування до 50%, особливо в нічний час, коли інтенсивність руху суттєво знижується. Крім того, встановлення та обслуговування світлофорів потребують значних фінансових витрат, що може становити до 70-80% від загальних витрат на організацію дорожнього руху на перехрестях.

На кругових перехрестях регулювання руху здійснюється за допомогою організаційних заходів та дорожньої розмітки, що дозволяє зменшити кількість конфліктних точок на 75%. Це, своєю чергою, підвищує безпеку руху на таких перехрестях на 40-60%. Завдяки плавному руху автомобілів і відсутності необхідності в зупинці на кожному вході до перехрестя, пропускна здатність збільшується на 20-30%. Водночас швидкість руху на таких перехрестях знижується на 30-50%, що також сприяє зменшенню тяжкості ДТП. Проте кругові перехрестя можуть бути проблематичними для водіїв, які не мають досвіду руху в таких умовах. Вони часто демонструють нижчий рівень комфортності руху для тих, хто не звик до такої організації. Крім того, на перехрестях із дуже високою інтенсивністю руху кругові перехрестя можуть бути менш ефективними, що потребує додаткових заходів щодо регулювання потоків транспорту.

Нерегульовані перехрестя або ті, що організовані через встановлення пріоритетів на дорозі, зазвичай використовуються на дорогах із малою інтенсивністю транспортних потоків. Такі перехрестя є економічно вигідними, оскільки їхнє облаштування та утримання потребують на 70-80% менше витрат, ніж встановлення світлофорів. Однак, через відсутність чітких розмежувань між потоками транспорту на таких перехрестях на 15-20% частіше трапляються ДТП, особливо в умовах збільшення інтенсивності руху. Відсутність світлофорів або інших засобів регулювання вимагає від водіїв підвищеної уваги, що може призводити до ризикових ситуацій. Особливо це стосується перехресть із складними транспортними умовами або високим пішохідним трафіком, де нерегульовані перехрестя не забезпечують достатнього рівня безпеки.

Світлофорне регулювання може бути поділено на кілька типів: фіксовані, адаптивні та інтелектуальні системи. Фіксовані світлофори працюють за статичними циклами, які не змінюються залежно від ситуації на дорозі. Такі системи характеризуються простотою впровадження та стабільністю роботи. Їхня перевага полягає в легкості налаштування та низьких витратах на обслуговування, однак їхня ефективність значно знижується в умовах змінного транспортного потоку, що може призводити до заторів у пікові години. Адаптивні світлофори дозволяють автоматично змінювати тривалість фаз руху на основі даних про інтенсивність руху. Використання таких систем дозволяє зменшити затори до 40%, а також оптимізувати пропускну здатність на 20-30% порівняно з фіксованими системами. Водночас вартість впровадження адаптивних світлофорів є значно вищою, оскільки вони потребують використання датчиків і камер для збору інформації.

Інтелектуальні світлофори є найсучаснішим типом регулювання дорожнього руху, який використовує штучний інтелект, машинне навчання та технології V2I (зв'язок транспортного засобу з інфраструктурою). Завдяки цим технологіям, інтелектуальні світлофори здатні прогнозувати транспортні потоки та попереджати про виникнення заторів, що дозволяє скоротити час очікування на перехрестях на 40-50%. Крім того, такі системи можуть автоматично надавати пріоритет громадському транспорту або екстреним службам, що підвищує їхню ефективність і гнучкість. Однак вартість впровадження інтелектуальних систем є найвищою серед інших типів світлофорів, і їхнє налаштування потребує складної інфраструктури та великих обсягів даних для аналізу.

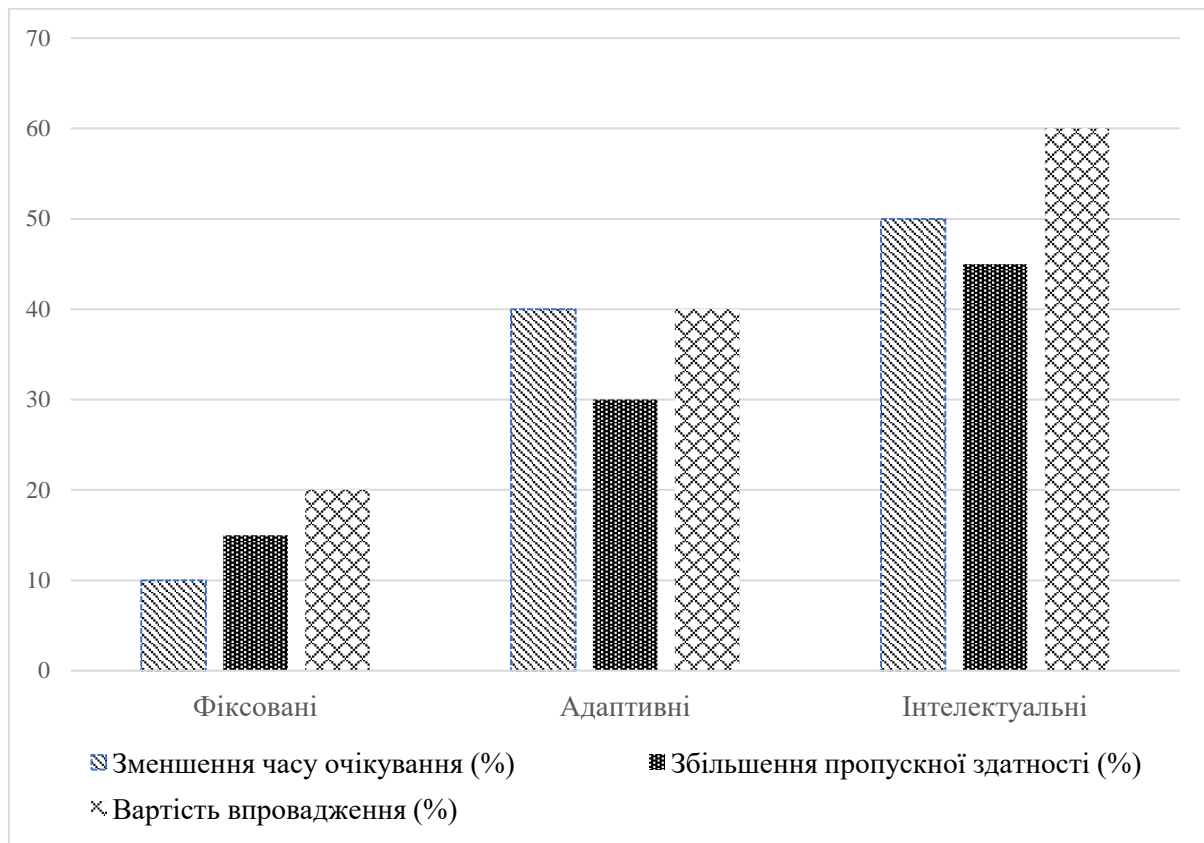


Рис. 1 – Порівняння ефективності світлофорних систем

Способи регулювання циклів світлофорів також можуть бути статичними або динамічними. Статичні цикли використовуються у фіксованих світлофорах, де час перемикання фаз є незмінним протягом дня. Це просте рішення, яке підходить для місць із стабільним транспортним потоком. Динамічні цикли використовуються в адаптивних і інтелектуальних системах, де час сигналу може змінюватися залежно від інтенсивності руху. У таких системах тривалість зеленої фази може автоматично подовжуватися або скорочуватися, що дозволяє мінімізувати затори та підвищити пропускну здатність перехрестя на 20-30%. Важливим аспектом є застосування пріоритету для певних транспортних засобів, наприклад, громадського транспорту або екстрених служб, що дозволяє скоротити час їхнього руху через перехрестя на 10-15%.

**Висновки.** На основі кількісних і якісних показників кожного способу регулювання можна зробити висновок, що для міст із високою інтенсивністю транспортного потоку найбільш доцільним є використання світлофорних систем, зокрема адаптивних або інтелектуальних. У той час як для менш завантажених ділянок можуть бути ефективними кругові або нерегульовані перехрестя, що є більш економічними, але менш безпечними.

Вибір типу світлофора та способу регулювання є важливим елементом управління дорожнього руху. Використання сучасних технологій таких як адаптивні системи, штучний інтелект та зв'язок між учасниками дорожнього руху та інфраструктурою може значно покращити безпеку та ефективність руху на перехрестях.

Для адаптивних, інтелектуальних, систем пріоритету та систем V2I важливою задачею є збір та обробка даних необхідних для прийняття рішення про зміну адаптивних циклів сигналу світлофора. Вдосконалення існуючих типів мереж давачів, розробка нових методів збору та обробки інформації є вкрай важливою. Також слід зауважити що обробка інформації з давачів для оптимізації динамічних циклів та налагодження зворотного зв'язку зазвичай потребує багато ресурсів, а системи на основі машинного навчання та штучного інтелекту потребують також значних затрат електроенергії, навченого персоналу, та вихідних даних, що робить їх дуже дорогими у впровадженні та використанні. Централізовані системи не можуть впоратися

з такими задачами або потребують значних ресурсів[16]. Отже одним із шляхів спрощення і здешевлення може бути використання системи розподілених обчислень, а для отримання зворотного зв'язку залучення учасників дорожнього руху.

#### Список літератури:

1. ДСТУ 4092-2002 «Світлофори дорожні. Загальні технічні вимоги, правила застосування та вимоги безпеки.»
2. Безпека дорожнього руху. Світлофори дорожні. Загальні технічні вимоги, правила застосування та вимоги безпеки: ДСТУ 4092-2002. – [Чинний від 2003-01-01]. – К. : Держстандарт України, 2002. – 27 с. – (Державний стандарт України).
3. Сайт Верховної ради України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1306-2001-%D0%BF#Text>
4. Толок А.В. ТСОДД Конспект лекцій // Основи світлофорного регулювання
5. Є. Ю. Форнальчик, І. А. Могила, В. Е. Трушевський, В. В. Гілевич Управління дорожнім рухом на регульованих перехрестях у містах
6. Трушевський В. Е., Турпак С. М., Грицай С. В. Розрахунок режимів світлофорного регулювання з урахуванням емпіричних характеристик руху транспорту // Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля - № 1 (242) - 2018 - 139-144
7. Д.В. Руденко; І.М. Мартиняк – Львівський ДУ безпекижиттєдіяльності // Розроблення моделі динаміки руху автомобілів через регульовані перехрестя з врахуванням управління світлофорними об'єктами.
8. Ghazal, B., ElKhatib, K., Chahine, K., & Kherfan, M. (2016, April). Smart traffic light control system. In 2016 third international conference on electrical, electronics, computer engineering and their applications (EECEA) (pp. 140-145). IEEE.
9. Wei, H., Zheng, G., Yao, H., & Li, Z. (2018, July). Intellilight: A reinforcement learning approach for intelligent traffic light control. In Proceedings of the 24th ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery & data mining (pp. 2496-2505).
10. De Schutter, B., & De Moor, B. (1998). Optimal traffic light control for a single intersection. European Journal of Control, 4(3), 260-276.
11. Turky, A. M., Ahmad, M. S., Yusoff, M. Z. M., & Hammad, B. T. (2009). Using genetic algorithm for traffic light control system with a pedestrian crossing. In Rough Sets and Knowledge Technology: 4th International Conference, RSKT 2009, Gold Coast, Australia, July 14-16, 2009. Proceedings 4 (pp. 512-519). Springer Berlin Heidelberg.
12. Miller, J. (2008, June). Vehicle-to-vehicle-to-infrastructure (V2V2I) intelligent transportation system architecture. In 2008 IEEE intelligent vehicles symposium (pp. 715-720). IEEE.
13. Dey, K. C., Rayamajhi, A., Chowdhury, M., Bhavsar, P., & Martin, J. (2016). Vehicle-to-vehicle (V2V) and vehicle-to-infrastructure (V2I) communication in a heterogeneous wireless network—Performance evaluation. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 68, 168-184.
14. Belanovic, P., Valerio, D., Paier, A., Zemen, T., Ricciato, F., & Mecklenbrauker, C. F. (2009). On wireless links for vehicle-to-infrastructure communications. IEEE Transactions on vehicular technology, 59(1), 269-282.
15. Sing Yiu Cheung, Sinem Coleri, Baris Dundar, Sumitra Ganesh, Chin-Woo Tan, and Pravin Varaiya. Traffic measurement and vehicle classification with a single magnetic sensor. Journal of the Transportation Research Board, February 2006.
16. Tubaishat, M., Shang, Y., & Shi, H. (2007, January). Adaptive traffic light control with wireless sensor networks. In 2007 4th IEEE Consumer Communications and Networking Conference (pp. 187-191). IEEE.

#### References (transliterated):

1. DSTU 4092-2002 "Svitlofory dorozhni. Zahal'ni tekhnichni vymohy, pravyla zastosuvannia ta vymohy bezpeky." ["Traffic lights. General technical requirements, application rules and safety requirements."]
2. Bezpeka dorozhnoho rukhu. Svitlofory dorozhni. Zahal'ni tekhnichni vymohy, pravyla zastosuvannia ta vymohy bezpeky: DSTU 4092-2002. [Road safety. Traffic lights. General technical requirements, application rules and safety requirements: DSTU 4092-2002.] – [Chynnyi vid 2003-01-01]. – K. : Derzhstandart Ukrainy, 2002. – 27 s. – (Derzhavnyi standart Ukrainy).
3. Sait Verkhovnoi rady Ukrainy [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: [3. Website of the Verkhovna Rada of Ukraine [Electronic resource]. – Access mode:]<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1306-2001-%D0%BF#Text>
4. Tolok A.V. TSODD Konspekt lektsii [Tolok A.V. TSODD Synopsis of lectures] // Osnovy svitlofornoho rehuliuвання [Basics of traffic light regulation]
5. Ye. Yu. Fornal'chuk, I. A. Mohyla, V. E. Trushevs'kyi, V. V. Hilevych Upravlinnia dorozhnim rukhom na rehuliovanykh perekhrestyakh u mistakh [Traffic management at regulated intersections in cities]
6. Trushevs'kyi V. E., Turpak S. M., Hrytsai S. V. Rozrakhunok rezhymiv svitlofornoho rehuliuвання z urakhuvanniam empyrychnykh kharakterystyk rukhu transportu [Calculation of traffic light regulation modes taking into account the empirical characteristics of traffic ]// Visnyk skhidnoukrains'koho natsional'noho universytetu imeni

- Volodymyra Dalia [Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl] - № 1 (242) - 2018 - 139-144
7. D.V. Rudenko; I.M. Martyniak – L'vivs'kyi DU bezpeky zhyttiediiial'nosti [Lviv State University of Life Safety] // Rozroblennia modeli dynamiky rukhu avtomobiliv cherez rehuliovani perekhrestia z urakhuvanniam upravlinnia svitlofornymy ob'iektamy [Development of a model of the dynamics of car movement through regulated intersections, taking into account the management of traffic lights.].
  8. Ghazal, B., ElKhatib, K., Chahine, K., & Kherfan, M. (2016, April). Smart traffic light control system. In 2016 third international conference on electrical, electronics, computer engineering and their applications (EECEA) (pp. 140-145). IEEE.
  9. Wei, H., Zheng, G., Yao, H., & Li, Z. (2018, July). Intellilight: A reinforcement learning approach for intelligent traffic light control. In Proceedings of the 24th ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery & data mining (pp. 2496-2505).
  10. De Schutter, B., & De Moor, B. (1998). Optimal traffic light control for a single intersection. European Journal of Control, 4(3), 260-276.
  11. Turkey, A. M., Ahmad, M. S., Yusoff, M. Z. M., & Hammad, B. T. (2009). Using genetic algorithm for traffic light control system with a pedestrian crossing. In Rough Sets and Knowledge Technology: 4th International Conference, RSKT 2009, Gold Coast, Australia, July 14-16, 2009. Proceedings 4 (pp. 512-519). Springer Berlin Heidelberg.
  12. Miller, J. (2008, June). Vehicle-to-vehicle-to-infrastructure (V2V2I) intelligent transportation system architecture. In 2008 IEEE intelligent vehicles symposium (pp. 715-720). IEEE.
  13. Dey, K. C., Rayamajhi, A., Chowdhury, M., Bhavsar, P., & Martin, J. (2016). Vehicle-to-vehicle (V2V) and vehicle-to-infrastructure (V2I) communication in a heterogeneous wireless network—Performance evaluation. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 68, 168-184.
  14. Belanovic, P., Valerio, D., Paier, A., Zemen, T., Ricciato, F., & Mecklenbrauker, C. F. (2009). On wireless links for vehicle-to-infrastructure communications. IEEE Transactions on vehicular technology, 59(1), 269-282.
  15. Sing Yiu Cheung, Sinem Coleri, Baris Dundar, Sumitra Ganesh, Chin-Woo Tan, and Pravin Varaiya. Traffic measurement and vehicle classification with a single magnetic sensor. Journal of the Transportation Research Board, February 2006.
  16. Tubaiشات, M., Shang, Y., & Shi, H. (2007, January). Adaptive traffic light control with wireless sensor networks. In 2007 4th IEEE Consumer Communications and Networking Conference (pp. 187-191). IEEE.

*Надійшла (received) 21.09.2024 р.*

*Відомості про авторів / About the Authors*

**Склярів Олексій Володимирович (Skliarov Oleksii)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри автомобіле- і тракторобудування; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9907-1276>; e-mail: [Oleksii.Skliarov@mit.khpi.edu.ua](mailto:Oleksii.Skliarov@mit.khpi.edu.ua).

**Селевич Сергій Геннадійович (Selevych Serhii)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автомобіле- і тракторобудування; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2162-4992>; e-mail: [Serhii.Selevych@khpi.edu.ua](mailto:Serhii.Selevych@khpi.edu.ua).