

ПЛАНУВАННЯ МІСЬКОЇ ВУЛИЧНО-ДОРОЖНЬОЇ МЕРЕЖІ З УРАХУВАННЯМ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

¹Вінницький національний технічний університет

²Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Анотація

У роботі досліджено сутність, структуру та функціональне призначення вулично-дорожньої мережі як фундаментальної основи просторової організації сучасного міста. Проаналізовано класифікацію елементів ВДМ та обґрунтовано критичну необхідність її модернізації на засадах інтеграції принципів сталого розвитку та енергоефективності. Визначено, що суттєве зниження енерговитрат транспортним комплексом досягається завдяки впровадженню інтелектуальних транспортних систем та адаптивного керування світлофорами. Встановлено головну стратегічну тенденцію – перерозподіл простору ВДМ на користь пріоритезації громадського електричного та немоторизованого транспорту для мінімізації загальної енергоємності.

Ключові слова: вулично-дорожня мережа; енергоефективне планування; інтелектуальні транспортні системи; модальний перехід.

Abstract

The paper examines the essence, structure, and functional purpose of the street and road network as the fundamental basis for the spatial organization of a modern city. It analyzes the classification of street and road network elements and substantiates the critical need for its modernization based on the integration of the principles of sustainable development and energy efficiency. It is determined that a significant reduction in energy consumption by the transport complex is achieved through the introduction of intelligent transport systems and adaptive traffic light control. The main strategic trend is established – the redistribution of the street and road network space in favor of prioritizing public electric and non-motorized transport to minimize overall energy consumption.

Keywords: street and road network; energy-efficient planning; intelligent transport systems; modal shift.

Вступ

Вулично-дорожня мережа (ВДМ) – це система транспортних і пішохідних зв'язків між елементами планувальної структури міста, яка призначена для організації руху транспорту і пішоходів, прокладання інженерних комунікацій, озеленення і благоустрою вулиць. Вулично-дорожня мережа міста формується як цілісна система, що взаємозв'язана з мережею транспортних магістралей району розселення. Структура мережі визначається загальною планувальною структурою та розмірами міста, взаєморозміщенням його частин [1].

Інтенсивний розвиток міст збільшує транспортне навантаження, що критично підвищує споживання палива та електроенергії вулично-дорожньою мережею. Традиційне планування ВДМ, сфокусоване лише на пропускній здатності, є енергонеефективним, спричиняючи значні втрати через затори та неефективне керування інфраструктурою. В умовах глобальної енергетичної кризи та відбудови України, перехід до енергоефективного та сталого планування ВДМ стає стратегічною необхідністю. Актуальність дослідження зумовлена потребою в науково обґрунтованих, інтегрованих методах, які гарантують мінімізацію енергетичних витрат транспортом та інфраструктурою.

Метою роботи є наукове обґрунтування та розробка методичних рекомендацій з планування та модернізації міської вулично-дорожньої мережі (ВДМ), спрямованих на суттєве зниження загального енергоспоживання транспортного комплексу. Досягнення цієї мети вимагає інтеграції принципів сталого розвитку, використання інтелектуальних транспортних систем (ITS) та пріоритезації енергоефективних видів транспорту. Це охоплює вирішення низки завдань: системний аналіз чинних підходів, класифікація джерел енергетичних втрат, розробка моделі оцінки енергоефективності ВДМ (за показниками швидкості та зупинок) та обґрунтування методики впровадження заходів

енергозбереження (зокрема, адаптивного керування світлофорами).

Результати досліджень

Вулично-дорожня мережа є фундаментальною основою просторової структури міста. Вона формує цілісну систему зв'язків для транспорту, пішоходів, інженерних комунікацій, озеленення та благоустрою. Функціонально ВДМ визначає доступність територій та економічний потенціал міста. Класифікація елементів ВДМ (магістралі загальноміського, районного та місцевого значення) необхідна для встановлення відповідного режиму руху і пропускної здатності, а також для визначення пріоритетів впровадження енергозберігаючих заходів. Таким чином, ВДМ виступає ключовим об'єктом регулювання та модернізації для досягнення цілей сталого розвитку.

Таблиця 1 узагальнює основні фактори, що формують енергетичні втрати у вулично-дорожній мережі. Найбільший вплив мають затори та неефективна організація руху, які призводять до циклів «старт–стоп» та зростання питомої витрати палива. Значним фактором є також використання застарілих систем освітлення, що збільшує енергоспоживання інфраструктури. Перевага приватного транспорту формує додаткове навантаження на мережу, що знижує її загальну енергоефективність.

Таблиця 1 – Джерела енергетичних втрат у вулично-дорожній мережі (ВДМ)

Джерело втрат	Характеристика	Вплив на енергоефективність
Затори	Низька середня швидкість руху; часті зупинки «старт–стоп»	Високий
Неефективне освітлення	Використання натрієвих ламп, відсутність керування яскравістю	Середній
Нераціональна організація руху	Налаштування світлофорів без адаптації; неузгоджені фази	Високий
Перевага приватного транспорту	Велика кількість авто → високі питомі енерговитрати	Дуже високий
Відсутність виділених смуг	Громадський транспорт втрачає ефективність	Середній

Сучасне планування транспорту відходить від пріоритету автомобільного руху, інтегруючи концепції сталого розвитку, обов'язкові для енергоефективної модернізації ВДМ. Центальною є концепція трьох дій: уникнення, перехід, вдосконалення. Уникнення передбачає зменшення потреби в поїздках через створення компактних районів; перехід – заохочення використання громадського електричного транспорту та немоторизованого руху; вдосконалення – підвищення енергоефективності самого транспорту та інфраструктури (впровадження розумних транспортних систем і освітлення). Енергозбереження у ВДМ безпосередньо корелюється з останніми двома принципами, вимагаючи технологічної модернізації та кардинальних планувальних рішень щодо перерозподілу простору на користь пріоритетних, енергоефективних видів пересування (надання виділених смуг та пріоритету проїзду громадському транспорту (особливо електричному) на перехрестях, створення безпечної та розвиненої інфраструктури для пішоходів та велосипедистів (велодоріжки, комфортні тротуари)) [2].

Енергозбереження у ВДМ сфокусовано на двох напрямках: зменшенні втрат електроенергії інфраструктурою та мінімізації витрат палива транспортом. Критичним є перехід на енергозберігаюче освітлення, зокрема масове впровадження світлодіодних (LED) світильників, які мають високий ККД. Додаткова економія досягається завдяки системам розумного освітлення з функцією димування, що регулюють яскравість залежно від умов руху. Для мінімізації втрат енергії транспортом ключовою є оптимізація трафіку через інтелектуальні транспортні системи та адаптивні системи керування дорожнім рухом (АСКД). Ці системи забезпечують "зелену хвилю", скорочуючи цикли "старт-стоп" і, відповідно, знижуючи витрати палива. Комплексне застосування цих технологій дозволяє досягти значної загальної енергоефективності ВДМ [3].

У таблиці 2 подано порівняння різних типів міських вулиць за рівнем можливого енергозбереження. Магістралі загальноміського значення характеризуються найбільшим потенціалом оптимізації, оскільки на них зосереджується основна частина транспортних потоків. Районні магістралі мають середній потенціал, зумовлений змішаною структурою руху. Місцеві та житлові вулиці демонструють менший рівень втрат, проте інфраструктурні заходи дозволяють досягати значного зниження електроспоживання. Таблиця відображає, що кожна категорія вулиць потребує окремого набору рішень, орієнтованих на пропускну здатність та характер руху.

Таблиця 2 – Зонування вулично-дорожньої мережі (ВДМ) за критеріями енергоспоживання

Зона	Категорія вулиць	Характеристика енергоспоживання	Основні причини втрат	Рекомендовані заходи енергозбереження	Очікуваний ефект
Зона А – Високої енергоемності	Магістралі загальноміського значення, ключові перехрестя	Максимальні втрати енергії через інтенсивний трафік, часті затримки, високе навантаження	Затори, неузгоджене світлофорне регулювання, хаотичні потоки	Впровадження ITS, адаптивні світлофори, координація «зеленої хвилі», виділені смуги для ГЕТ	Скорочення витрат енергії транспорту на 20–35%; зменшення затримок на 30–50%
Зона В – Середньої енергоемності	Магістралі районного значення, вулиці зі змішаними потоками	Помірні енергетичні втрати, переважно через нестабільні потоки та низьку пропускну здатність у години пік	Незбалансовані фази світлофорів, конфлікти потоків, недосконала геометрія	Оптимізація перехресть, часткова адаптація світлофорів, LED-освітлення	Економія 10–20%; підвищення стабільності руху
Зона С – Низької енергоемності	Вулиці місцевого значення, житлові вулиці	Низьке споживання енергії через слабкі транспортні потоки	Неефективне освітлення, зайве використання авто	LED-освітлення з димуванням, пріоритет пішохідних переходів, велоінфраструктура	Економія електроенергії 20–40%
Зона D – Мінімальної енергоемності	Пішохідні та рекреаційні вулиці, внутрішньо-квартальні простори	Витрати енергії мінімальні та переважно інфраструктурні	Освітлення, утримання територій	Розумне освітлення, сонячні світильники, скорочення автодоступу	До 60% зменшення споживання електроенергії
Зона Е – Змішана зона (перехідна)	Території між житловою та магістральною мережею	Коливання навантаження залежно від часу доби	Сезонні та часові піки, неузгоджені потоки	Локальні ITS-рішення, секційне освітлення, підвищення безпеки руху	Стабілізація потоку, 5–15% економії

Для суттєвого зниження енергетичних втрат транспортним потоком у вулично-дорожній мережі (ВДМ) застосовується оптимізація руху на основі інтелектуальних транспортних систем (ITS). Ключовим інструментом тут є адаптивне керування світлофорами та впровадження динамічної "зеленої хвилі". На відміну від жорстких циклів, адаптивні системи використовують інформацію в режимі реального часу від детекторів руху для коригування тривалості фаз світлофорного регулювання. Це забезпечує максимальну синхронізацію швидкості потоку та пропускну здатності ділянки, що прямо призводить до мінімізації примусових зупинок, зменшення часу простою транспортних засобів у заторі та, як наслідок, до скорочення витрат палива на 10-25%. Таким чином, оптимізація організації руху на основі ITS є найшвидшим і найбільш ефективним способом підвищення енергоефективності ВДМ на вже існуючій інфраструктурі.

Таблиця 3 структурує ключові елементи сучасних ITS, що впливають на енергоефективність транспортного комплексу міста. Датчики руху забезпечують оперативний збір даних для адаптації фаз світлофорів. Адаптивні світлофори дозволяють скоротити час простою транспорту та підвищити середню швидкість потоку. Центральні системи управління синхронізують мережу, забезпечуючи ефект «зеленої хвилі». Системи прогнозування мінімізують утворення заторів. У сукупності ці елементи формують інтелектуальну мережу, здатну зменшити втрати палива на 20–35%.

Таблиця 3 – Складові інтелектуальних транспортних систем (ITS)

Компонент	Функція	Вплив на енергоефективність
Датчики транспортного потоку	Вимірювання швидкості, щільності, складу потоку	Зменшення затримок
Адаптивні світлофори	Автоматичне коригування фаз світлофора	10–25% економії палива
Камери та відеоаналітика	Аналіз реального часу; виявлення заторів	Підвищення стабільності руху
Централізований диспетчерський центр	Координація роботи мережі	Максимізація ефекту ITS
Системи прогнозування	Прогноз заторів; оптимізація маршрутів	Зниження затримок на магістралях

Зниження загальної енергоемності транспортного комплексу міста є неможливим без впливу на планувальну структуру та стимулювання модального переходу. Це досягається через пріоритезацію громадського електричного транспорту (ГЕТ) та немоторизованого руху. Основним планувальним заходом є перерозподіл простору вулично-дорожньої мережі (ВДМ) на користь цих видів, що передбачає виділення та фізичне відокремлення смуг для ГЕТ, а також будівництво безпечної, інтегрованої велосипедної інфраструктури та комфортних пішохідних зон. Такі структурні зміни безпосередньо впливають на вибір способу пересування мешканців, знижуючи залежність від приватного автомобіля. У довгостроковій перспективі це гарантує скорочення споживання моторного палива та викидів, що робить цей захід одним із найбільш ефективних стратегічних рішень для енергозбереження та досягнення цілей сталого розвитку [4].

Проектні рішення щодо формування енергоефективних зон у ВДМ повинні прийматися на основі інтеграції містобудівної документації (генеральний план, детальні плани, комплексні схеми транспорту) з результатами енергетичного аудиту [5]. Методичні рекомендації щодо планування ВДМ з врахуванням енергозбереження передбачають зонування мережі за потенціалом енергозбереження та категорією вулиці. Для магістралей загальноміського значення пріоритетом є впровадження адаптивного керування трафіком (АСКД) для забезпечення оптимального швидкісного режиму та мінімізації втрат енергії рухомим складом. У зонах місцевого значення та на транспортно-пішохідних вулицях, де розрахункова інтенсивність руху нижча, необхідно пріоритезувати рішення, що стосуються інфраструктурної економії (розумне LED-освітлення з димуванням) та модального переходу (оптимізація геометрії перехресть для безпечного руху немоторизованого транспорту). Такий підхід забезпечує відповідність проектних рішень як експлуатаційним, так і критично важливим екологічним вимогам, максимізуючи загальний ефект енергозбереження у міському масштабі.

Висновки

Проведене дослідження науково обґрунтувало необхідність переходу від традиційного планування вулично-дорожньої мережі (ВДМ) до енергоефективного та сталого підходу, що є критично важливим в умовах глобальної кризи та відбудови українських міст. Було встановлено, що максимальне зниження загального енергоспоживання транспортного комплексу міста досягається шляхом інтеграції двох основних стратегій: технологічної модернізації інфраструктури та структурних змін організації руху. Зокрема, це охоплює впровадження вискоенергоефективного LED-освітлення з функцією димування та застосування інтелектуальних транспортних систем з адаптивним керуванням світлофорами. Оптимізація трафіку через динамічну "зелену хвилю" є найшвидшим способом скоротити втрати палива транспортом на 10-25% на вже існуючій мережі.

На основі системного аналізу розроблено методичні рекомендації, які передбачають зонування ВДМ відповідно до категорії вулиці та потенціалу енергозбереження. Для досягнення довгострокової стійкості ключовим планувальним заходом визнано модальний перехід: необхідно пріоритезувати громадський електричний транспорт та немоторизований рух через перерозподіл простору ВДМ (виділені смуги, велосипедна інфраструктура). Обґрунтований комплекс інтегрованих заходів – від адаптивного керування трафіком на магістралях до інфраструктурної економії на місцевих вулицях – дозволяє не лише забезпечити функціональність транспортної системи, а й гарантувати системну мінімізацію енергетичних витрат, що є стратегічною основою для сталого розвитку та планування міст майбутнього.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Степанчук О.В. Особливості та закономірності руху на вулично-дорожній мережі міста: монографія. Київ: НАУ. С. 408-434.
2. Безлюбченко О.С., Гордієнко С.М., Завальний О.В. Планування міст і транспорт: Навчальний посібник.. Харків: ХНАМГ, 2006. 138 с.
3. Зосименко В.В. Енергозбереження у транспортній галузі: матеріали 77-ї студентської науково-технічної конференції "Тиждень студентської науки", м. Дніпро. С. 305-307.
4. Інформаційні системи і технології в міському просторі : монографія [М. В. Новожилова, А. Л. Литвинов, В. Є. Зайцев та ін.] ; за заг. ред. М. В. Новожилової ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. 292 с.

5. ДБН В.2.3-5:2018 Вулиці та дороги населених пунктів. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3199686959802877315?doc_type=2

Удуденко Єлизавета Вікторівна – студентка групи БМ-23б, факультет будівництва цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: ududenkoliza29@gmail.com

Куленко Анна Вікторівна – студентка групи АДВ-24б, факультет будівництва цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: kulenko.anna123@gmail.com

Кучеренко Лілія Василівна – канд. техн. наук, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, email: kucherenko@vntu.edu.ua

Галушко Валентина Олександрівна – д-р техн. наук, доцент, професор кафедри будівельних конструкцій, будівлі та споруд, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, e-mail: halushko.valentyna@nung.edu.ua

Ududenko Yelyzaveta V. – student of BM-23b group, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: ududenkoliza29@gmail.com

Kulenko Anna V. – student of ADV-24b group, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kulenko.anna123@gmail.com

Kucherenko Liliya V. – PhD, Associate Professor, Department of Construction, Urban Economy and Architecture, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: kucherenko@vntu.edu.ua

Halushko Valentyna O. – Dr. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Professor of the Chair of of Building Structures, Buildings and Structures, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, e-mail: halushko.valentyna@nung.edu.ua