УДК 656.13:620.9:711.73

В. В. Любич

В. Ф. Сидоренко

ТРАНСПОРТНА ОПТИМІЗАЦІЯ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ НА МІСЬКИХ ДОРОГАХ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Обґрунтовано оцінювання транспортної оптимізації за енерговитратами на виконану пасажирську роботу та доступністю міських функцій. Запропоновано послідовність порівняння сценаріїв організації руху з урахуванням попиту, заповнення транспортних засобів і перерозподілу потоків. Показано обмеження використання середньої швидкості як самостійного показника енергетичної ефективності.

Ключові слова: міські дороги, енергоспоживання транспорту, пасажирська робота, громадський транспорт, організація руху.

Abstract

Transport optimisation is assessed using energy per unit of passenger activity together with access to urban functions. A sequence for comparing traffic management scenarios is proposed, accounting for travel demand, vehicle occupancy and flow redistribution. Limitations of average speed as a stand-alone energy efficiency indicator are identified.

Keywords: urban roads, transport energy use, passenger activity, public transport, traffic management.

Вступ

Енергоспоживання міського транспорту залежить від довжини поїздок, режимів руху, типу транспортних засобів та їх заповнення. Зменшення затримки на окремому перехресті може покращувати локальні умови, але не обов’язково знижує загальні витрати енергії в мережі. Оптимізація має оцінювати виконання транспортної роботи й доступність пунктів призначення. Мета роботи — запропонувати послідовність енергетичного порівняння транспортних сценаріїв для міських доріг.

Результати дослідження

Міжнародні підходи до розвитку міської мобільності поєднують керування попитом, зміну структури поїздок та підвищення ефективності транспортних засобів [1]. Для міського планування це означає, що налаштування світлофорів має розглядатися разом із маршрутною мережею, пішохідними зв’язками й розміщенням функцій. Скорочення потреби в зайвих переміщеннях і забезпечення доступних альтернатив можуть впливати на енергоспоживання не менше, ніж технічне вдосконалення окремого автомобіля.

Оцінювання пропонується виконувати послідовно: встановити межі мережі й період; перевірити базовий попит; змоделювати сценарії; визначити енерговитрати; зіставити доступність і якість обслуговування. В усіх варіантах потрібно узгодити обсяг транспортної роботи, інакше відмінність споживання може пояснюватися різним попитом.

Для ділянки мережі доцільно обчислювати витрати енергії на одиницю пасажирської роботи:

$$e_p = \frac{E_\Sigma}{\sum_{i=1}^{N} n_i \, l_i}$$

де ЕΣ — сумарна енергія рухомого складу в межах оцінювання, кВт·год; ni — кількість пасажирів у поїздці або на відповідному сегменті; li — довжина, км. Для транспортних засобів з двигунами внутрішнього згоряння паливо переводиться в енергетичні одиниці за прозоро визначеною теплотою згоряння. Електрична енергія на вході зарядного пристрою та енергія на тягу є різними межами обліку, які не можна довільно змішувати.

Ілюстративно: 100 автомобілів, у кожному з яких перебуває одна особа, проїжджають 5 км за умовної витрати 0,18 кВт·год/км і споживають 90 кВт·год на 500 пасажиро-кілометрів. Два автобуси із 50 пасажирами кожен на такій самій відстані за умовної витрати 1,2 кВт·год/км споживають 12 кВт·год. Питомі значення становлять відповідно 0,18 і 0,024 кВт·год/(пас.·км). Це приклад впливу заповнення, а не виміряна перевага конкретного міського маршруту.

У реальному порівнянні враховуються порожні пробіги, пересадки, очікування, доступ до зупинок і зміна заповнення протягом дня. Показник на пасажиро-кілометр необхідно доповнювати витратами на завершену поїздку, інакше подовження маршруту може створити хибне враження ефективності. Для електротранспорту окремо аналізуються рекуперація та допоміжне споживання. Висновки про викиди потребують додаткових коефіцієнтів для відповідного виду енергії та не виводяться безпосередньо з порівняння кіловат-годин.

Серед інфраструктурних заходів доцільно перевіряти пріоритет громадського транспорту, координацію світлофорів, організацію зупинок і усунення необґрунтованих об’їздів. Ефект координації залежить від швидкісного режиму й напрямку потоків; скорочення зупинок одного напрямку може збільшити затримки іншого. Тому в моделі слід аналізувати всю мережу, включно із суміжними вулицями. Зростання пропускної здатності може також змінювати попит, що потребує окремого сценарію [2].

Доступність і безпека є обов’язковими умовами вибору. Економія автомобільної енергії не повинна досягатися погіршенням пішохідних зв’язків. Для міської ради слід подавати разом сумарну енергію, пасажирську роботу, час поїздки та надійність громадського транспорту. Активна мобільність потребує безперервної й безпечної інфраструктури [3].

Розрахункові сценарії та оцінювання ефективності

Для енергетичного порівняння транспортних сценаріїв пропонується поєднувати показник на пасажиро-кілометр з витратою на завершену поїздку. Перший характеризує енергію виконаної транспортної роботи, другий — енергію забезпечення факту переміщення користувача між потрібними пунктами. Вони можуть змінюватися у різних напрямках. Тому покращення питомої величини без аналізу довжини маршрутів і загального попиту не є достатнім доказом зменшення енергоспоживання міста. Для кожного сценарію слід наводити спільний набір вихідних і результативних показників.

Середня витрата енергії на завершену поїздку визначається за співвідношенням:

$$e_{trip} = \frac{E_{\Sigma}}{N_{trip}}$$

де etrip — енергія на одну завершену поїздку; EΣ — сумарна енергія в прийнятій межі; Ntrip — кількість таких поїздок. Поїздка з пересадкою має бути зарахована відповідно до єдиного правила, щоб зміна маршрутної мережі не створювала штучного приросту їхньої кількості. Для зіставлення слід узгодити склад користувачів і цілі переміщень. Показник не враховує якість послуги автоматично, тому його потрібно доповнювати тривалістю, надійністю та доступністю кінцевих пунктів. Саме скорочення числа обслужених поїздок не слід представляти як транспортну ефективність.

Розглянемо умовні варіанти А і Б для 500 завершених пасажирських поїздок. У варіанті А сумарна енергія становить 100 кВт·год, а середня відстань — 4 км. Транспортна робота дорівнює 2000 пас.·км, питома енергія — 0,050 кВт·год/(пас.·км), а витрата на поїздку — 0,20 кВт·год. У варіанті Б енергія становить 110 кВт·год, а середня відстань — 5 км: отримуємо 2500 пас.·км, 0,044 кВт·год/(пас.·км) та 0,22 кВт·год на поїздку. Питома величина на кілометр поліпшується на 12 %, хоча загальна енергія та енергія на поїздку зростають на 10 %. Це демонстраційний приклад впливу довжини маршруту.

Для пояснення результату слід перевірити, чи збільшення відстані зумовлене корисним розширенням доступності, чи є наслідком об’їзду й незручної пересадки. Однакова транспортна робота не означає однакової користі для населення. Аналогічно менша середня тривалість автомобільної поїздки може поєднуватися зі збільшенням часу пішохідного доступу до зупинки. Тому в міській оцінці потрібно зберігати весь ланцюг переміщення від початкової до кінцевої точки. Витрати окремої ділянки або одного виду транспорту не повинні приховувати погіршення решти цього ланцюга.

Допоміжний показник доступності потрібних міських функцій можна подати як:

$$A_{\tau} = \frac{\sum_{j=1}^{M} w_j I_j}{\sum_{j=1}^{M} w_j}$$

де Aτ — частка зважених пунктів призначення, доступних у межах часу τ; wj — погоджена вага пункту j; Ij — одиниця, якщо час досягнення tj не перевищує τ, та нуль в іншому випадку; M — кількість пунктів. Час має включати всі складові відповідного способу переміщення. Значення τ і ваги визначаються завданням планування та не є універсальними нормативами. Для порівняння сценаріїв

вони залишаються незмінними. Показник слід подавати окремо для груп населення або територій, якщо середній результат може приховувати локальне погіршення.

У найпростішому умовному випадку зі ста рівнозначними пунктами призначення доступність 80 пунктів відповідає $A\tau = 0{,}80$. Якщо енергозберігальний сценарій залишає доступними лише 75 пунктів, зниження енергії супроводжується погіршенням цього показника. Такий варіант не можна автоматично визнавати кращим за завдання збереження доступності. Потрібно встановити, які саме функції втратили досяжність і для яких користувачів. Для об’єктів першочергового значення може знадобитися окрема обов’язкова умова, яку не компенсує збільшення доступності менш важливих пунктів.

Оцінювання світлофорної координації потребує перевірки розподілу затримок між напрямками та видами руху. Зменшення числа зупинок основного автомобільного потоку не гарантує зменшення сумарних витрат, якщо бічні напрямки або громадський транспорт очікують довше. Доцільно розглядати кілька рівнів попиту та зміну заповнення транспортних засобів. Для електротранспорту енергія залежить також від режиму допоміжних систем у період простою. Результат потрібно розкладати за групами користувачів, щоб прийнятий сценарій мав зрозуміле пояснення, а не лише кращу середню швидкість.

Підсумкове рішення пропонується формувати поетапно. Спочатку відсіюються варіанти, що порушують установлені умови безпеки, доступності або якості перевезень. Далі серед прийнятних сценаріїв порівнюються загальна енергія, витрати на поїздку та реалізацію заходу. Для близьких результатів необхідно показати чутливість до попиту й похибки вихідних даних. Після впровадження слід повторити оцінювання за тією самою методикою та пояснити відмінності між прогнозом і фактом. Такий порядок дозволяє пов’язати енергетичну оптимізацію з реальною міською послугою й уникнути рішень, що поліпшують окремий показник ціною погіршення мобільності.

Практична реалізація та перевірка результатів

Практичну перевірку транспортної оптимізації пропонується починати з визначення території, часових меж та складу поїздок. Для локального перехрестя потрібно враховувати суміжні ділянки, на які можуть переноситися черги й об’їзди. Для міського коридору слід зафіксувати пасажирський попит і доступність кінцевих пунктів. Базовий сценарій має відображати фактичні умови, а не довільно обраний нераціональний режим. Однакові межі оцінювання дозволяють зіставити наслідки зміни організації руху без приховування частини витрат за межами модельованої ділянки.

Вихідні дані доцільно збирати окремо для транспортного потоку й пасажирської роботи. Інтенсивність руху не показує кількості перевезених людей без відомостей про заповнення транспортних засобів. Для громадського транспорту необхідно враховувати напрямки, часові інтервали та порожні пробіги. Для пішохідного й велосипедного руху важливі безперервність маршрутів і час доступу до потрібної функції. Дані різних джерел мають бути узгоджені за періодом спостереження. Інакше різниця між варіантами може характеризувати зміну попиту, а не результат запропонованого заходу.

До набору сценаріїв пропонується включити координацію світлофорів, пріоритет громадського транспорту, зміну маршрутної мережі та поліпшення умов активної мобільності. Спочатку кожен захід варто перевіряти окремо, після чого оцінювати їхні сумісні комбінації. Ефекти комбінації не можна без перевірки визначати сумою ефектів окремих заходів, оскільки вони впливають на ті самі потоки й затримки. Для кожного варіанта слід показати, які групи користувачів отримують виграш і чи не виникають додаткові втрати часу або доступності для інших учасників руху.

Енергетичну модель необхідно пов’язувати з режимами руху, а не тільки з довжиною маршруту. Доцільно враховувати зупинки, розгони, тривалість простою та допоміжне споживання відповідно до рівня деталізації вихідних даних. Для електротранспорту повернення енергії під час гальмування слід враховувати в межах обраної моделі, не додаючи його повторно як незалежну економію. Порівняння різних видів транспорту потребує однакової межі енергетичного обліку. Витрата пального, енергія з акумулятора й електроенергія на вході заряджання є різними початковими величинами.

Пасажиро-кілометри доцільно доповнювати числом завершених поїздок, їхньою тривалістю та досяжністю основних міських функцій. Подовження маршруту може збільшити транспортну роботу й зменшити питоме значення енергії без поліпшення результату для пасажира. Аналогічно скорочення витрат автомобільного потоку не є достатнім обґрунтуванням, якщо воно ускладнює доступ до зупинок або подовжує пішохідні переходи. Тому мінімальні вимоги до безпеки та доступності слід задати до

оптимізації. Енергетичний критерій застосовується серед варіантів, які забезпечують ці обов'язкові умови.

Стійкість результату пропонується перевіряти за зміни попиту, частки громадського транспорту та фактичного заповнення транспортних засобів. Окремі сценарії мають охоплювати години максимуму, міжпіковий період і можливі обмеження пропускної здатності. Зростання швидкості може змінювати привабливість маршруту, тому для масштабних заходів доцільно оцінювати можливий перерозподіл поїздок. Потрібно розділяти короткостроковий результат за фіксованого попиту та наслідки після адаптації користувачів. Висновок, стійкий лише за одного набору вихідних умов, потребує обережного використання в міському плануванні.

Після впровадження заходу необхідна перевірка за зіставними спостереженнями до й після зміни організації руху. У звіті слід разом подавати енергію, обсяг перевезень, час поїздок, регулярність громадського транспорту та показники доступності. Погодні умови, дорожні роботи й зміни маршрутів фіксуються як чинники, що можуть впливати на порівняння. Для міської ради результат доцільно представляти за групами користувачів і територіями. Такий підхід дозволяє обрати транспортне рішення, яке зменшує витрати енергії без прихованого погіршення міської мобільності та створює основу для подальшого коригування за фактичними даними.

Висновки

Транспортна оптимізація має зменшувати витрати енергії на забезпечення міської мобільності за збереження доступності й безпеки. Запропонована послідовність пов'язує попит, сценарій руху та енергетичний результат. Питоме споживання на пасажиро-кілометр потрібно доповнювати показниками завершеної поїздки й загальними витратами мережі. Перевірка на фактичних транспортних даних дозволить відокремити локальне скорочення затримок від системного ефекту для міста.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. International Transport Forum. ITF Transport Outlook 2023. Paris : OECD Publishing, 2023. 216 p. DOI: 10.1787/b6cc9ad5-en

2. International Transport Forum. Reversing Car Dependency: Summary and Conclusions. Paris : OECD Publishing, 2021. DOI: 10.1787/bebe3b6e-en

3. International Transport Forum. Improving the Quality of Walking and Cycling in Cities: Summary and Conclusions. ITF Roundtable Reports. No. 192. Paris : OECD Publishing, 2023. 70 p. DOI: 10.1787/cdeb3fe8-en

Любич Володимир Володимирович — аспірант, асистент кафедри промислового та цивільного будівництва, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: mr.lyubich1988@gmail.com

Сидоренко Владислава Федорівна — студентка кафедри промислового та цивільного будівництва, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: sydorenko.vladyslavaa@gmail.com

Liubych Volodymyr Volodymyrovych — PhD student, Assistant at the Department of Industrial and Civil Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mr.lyubich1988@gmail.com

Vladyslava Fedorivna Sydorenko — *student in the Department of Industrial and Civil Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: sydorenko.vladyslavaa@gmail.com*