

міжнародного форуму молоді «Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті» 04-05. 04. 2024. Харків: ДБТУ, 2024 С. 192.

4. Bekker M. G. Theory of Land Locomotion: The Mechanics of Vehicle Mobility. — Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1969.

5. Wong J. Y. Theory of Ground Vehicles. — 4th ed. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.

6. ASABE Standards. Agricultural Machinery Management Data (D497). — St. Joseph (MI): ASABE, (ост. ред.).

7. Oksanen T., Visala A. Coverage path planning algorithms for agricultural field machines // Journal of Field Robotics. — 2009. — 26(8). — С. 651–668.

8. Bochtis D., Vougioukas S. Minimising the non-working distance travelled by machines operating in a headland field pattern // Biosystems Engineering. — 2008. — 101(1). — С. 1–12.

9. ISO 11783. Tractors and machinery for agriculture and forestry — Serial control and communications data network (ISOBUS). — Geneva: ISO, (чинне вид.).

**УДК 656.13.066:004.8:502.175**

## **AI-ESCO-ROUTING: ЗМЕНШЕННЯ ВИТРАТ ПАЛЬНОГО Й ВИКИДІВ З УРАХУВАННЯМ ТРАФІКУ ТА РЕЛЬЄФУ**

**Манойло Володимир Максимович**, докт. техн. наук, професор каф. ДВЗ,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,  
e-mail: volodimir.m.manoylo@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2208-4404

**Макаренко Микола Григорович**, доцент каф. «Трактори і автомобілі»,  
Державний біотехнологічний університет,  
e-mail: mak\_nk@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4078-9045

**Шевченко Ігор Олександрович**, канд. техн. наук, доцент, завідувач каф.  
«Трактори і автомобілі», Державний біотехнологічний університет,  
e-mail: igorshvchnk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1280-5290

Традиційні навігаційні системи здебільшого мінімізують час у дорозі, ігноруючи мікродинаміку «старт-стоп» і рельєф, що на практиці підвищує реальні витрати пального та викиди, особливо в заторах і на підйомах [1, 9]. AI-esco-routing пропонує альтернативу: обирати маршрут з урахуванням динаміки трафіку та ухилів/мікрорельєфу, мінімізуючи паливо й викиди при контрольованій затримці [1, 8].

Ключовою вимогою є ETA (Estimated Time of Arrival) як жорстке або ймовірнісне обмеження: маршрут повинен дотриматися дедлайну (або забезпечити високий рівень довіри до прибуття вчасно), зважаючи на стохастичність трафіку [7]. ETA (Estimated Time of Arrival) у нашому формулюванні виступає жорсткою або ймовірнісною вимогою: маршрут має забезпечувати прибуття не пізніше заданого дедлайну (або з високою довірою, наприклад, у 95-му перцентилі часу) за умов стохастичних коливань трафіку

[7]. Це усуває «надто зелені» траси з великою затримкою та робить есо-routing практично придатним для служб зобов'язань щодо часу (SLA) і для комерційних перевезень, де допустимий час не можна перевищити. Таким чином, есо-routing стає операційно придатним для служб перевізників, де час доставки критичний.

Дорожня мережа задається OSM-сумісним графом з атрибутами: обмеження швидкості, кількість смуг, світлофори/перехрестя, радіуси кривизни, профілі ухилу з цифрової моделі висот, а також часові профілі трафіку (історичні та оперативні) — швидкість/щільність руху за годинами доби та подіями [10]. Для великовантажних ТЗ додаються обмеження за маневреністю та максимально допустимим ухилом.

В якості енергетично-емісійної моделі застосовано гібридну схему:

фізично обґрунтований сурогат енергобалансу оцінює роботу переборення опорів кочення, аеродинаміки, гравітаційної складової на ухилі та інерційної компоненти під час розгону з урахуванням ККД трансмісії та карти паливної економічності (BSFC) — для коректного відтворення впливу рельєфу й швидкісного режиму [8];

даними-керований предиктор (градієнт-бустинг/NN) апроксимує миттєву витрату пального та питомі викиди як функції швидкості, прискорення, зупинок, ухилу, температури, характеристик трафіку — для відтворення підвищення CO<sub>2</sub>/витрат у «старт-стоп» трафіку [1; 9].

Такий підхід дозволяє: коректно відтворювати ефект заторів і «пилу зупинок-розгонів» (різкий ріст витрат та викидів за низьких швидкостей і частих зупинок) [1, 9]; моделювати ухили: на підйомах енергоспоживання та NO<sub>x</sub>/димність для важких ТЗ збільшуються, а на спусках можливе рекуперативне/холосте переміщення залежно від силового агрегата [8]; урахувати коливання термостану (холодний запуск, ефективність нейтралізації) через емпіричні поправки з валідацією на бортових даних [4–6].

Параметри та емісійні коефіцієнти при калібруванні/верифікації налаштовуються на телематиці OBD/J1939 і пілотних заїздах; для інвентаризаційних звітів підтримуються довідники HBEFA/COPERT/MOVES як «якорі» перевірки класів доріг/швидкостей і сезонних умов [4–6]. Застосовується доменно-адаптивне донавчання під конкретний парк і регіон. Для пального/викидів подаються довірчі інтервали (квантілі), що далі застосовуються у стохастичній оптимізації й ЕТА-обмеженнях [7].

При оптимізації маршруту мінімізується зважена сума пального та викидів (CO<sub>2</sub>; за потреби – NO<sub>x</sub>/PM) за ЕТА-обмеження – жорстке (детерміноване) або ймовірнісне (chance-constraint), а також з урахуванням інфраструктурних лімітів (доступність доріг, мінімальні радіуси поворотів, максимальні ухили, «зони низьких викидів») [7].

Використовується наступний алгоритм.

1. Глобальний пошук з евристикою нижньої межі енерговитрат на ребрі (за фізичною моделлю, з ухилом і лімітами швидкості) – для масштабованості [8; 10].

2. Локальна дооптимізація в «коридорі» альтернатив (кілька найкращих шляхів за часом/довжиною): ітераційний локальний пошук/label-setting для багатокритеріального скорочення пального/викидів без порушення ЕТА; усуваються «світлофорні пастки», згладжується профіль прискорень, уникаються ділянки з дисперсними ухилами [7; 9].

3. ЕТА як гарантія: ймовірнісне обмеження «встигнути до дедлайну з довірою  $\geq 95\%$ » або  $\varepsilon$ -обмеження з буфером ЕТА [7].

4. Онлайн-перепланування (receding-horizon) з гістерезисом для зменшення «миготіння» рекомендацій.

Для легкових парків доцільна еквівалентність паливо $\approx$ CO<sub>2</sub>; для дизельних НСV у міських умовах — підвищена вага NO<sub>x</sub>, узгоджена з локальними екологічними обмеженнями [2; 5].

У симуляційних сценаріях AI-eco-routing стабільно віддавав пріоритет маршрутам з меншою кількістю повних зупинок і нижчою дисперсією ухилів, що зменшувало піки прискорень і менші затрати на підйомах [8; 9].

На мережах із щільними світлофорами досягався ефект «синхронізації» проходів (менше червоних фаз) за рахунок альтернативних вулиць із подібним ЕТА, але кращим енергетичним профілем [1; 9]. Пілотні заїзди підтвердили узгодженість оцінок моделі з бортовими вимірами пального (середня похибка у межах міжквартильного розмаху 5–8%) та чутливість ефекту до якості профілів трафіку/погоди; потреба регулярної рекалібровки під парк і сезон узгоджується з рекомендаціями інвентаризаційних довідників [4–6].

На цифрових двійниках і в пілотах AI-eco-routing забезпечив типове зменшення пального на 8–15% і CO<sub>2</sub> на 7–14% порівняно з класичним «мінімум часу», при зростанні ЕТА на 3–6% у години «піку». Для легкого трафіку різниця в ЕТА була статистично незначущою.

Перевірка непараметричним критерієм Вілкоксона дала  $p < 0,01$  для економії пального в усіх наборах сценаріїв. Спостережені закономірності узгоджуються з емпіричними результатами про вплив заторів і зупинок на витрати/викиди [1; 9].

На рівнинних маршрутах вигреш становив 4–7% завдяки уникненню світлофорних пасток. На хвилястому/гірському рельєфі економія зростала до 10–18% для легких авто й до 12–20% для дизельних НСV завдяки вибору трас із меншою дисперсією ухилів і уникненню розгонів перед тривалими підйомами [8].

У «пікові» години eco-routing зменшував кількість повних зупинок на 15–30% і піки поздовжніх прискорень на 10–22%, що забезпечувало нижчі питомі викиди на сегментах з низькими швидкостями [1; 9]. У «вільні» години різниця між маршрутами нівелювалася, але алгоритм утримував ЕТА у межах базового.

За ймовірнісного обмеження з довірою 95% емпірична частка порушень не перевищувала 2–4% (у т.ч. через неочікувані інциденти). Введення буфера ЕТА 2–3 хв скорочувало порушення до  $< 1\%$  ціною незначного зменшення

економії ( $\approx 0,5$  в.п.). Результат відповідає мережевим постановкам із випадковими часами [7].

Доменна адаптація за локальною телематикою знижувала витрати пального на 18–28% порівняно з «заводською» калібровкою. Використання довідкових емісійних бібліотек (HBEFA/COPERT/MOVES) як «якорів» дозволяло тримати  $\text{CO}_2/\text{NO}_x$  у межах очікуваних діапазонів для різних типів доріг і сезонів [4–6].

Помилки у профілях ухилу ( $\pm 1-2^\circ$ ) майже не впливали на вибір у рівнинних мережах, але в гірських зонах спричиняли до 1–2 в.п. втрати економії; застарілі профілі трафіку збільшували порушення ЕТА на 0,8–1,6 в.п., що мотивує частіше оновлення годинних матриць швидкостей.

Для легкового парку (7,5 л/100 км, 30 тис. км/рік) економія 10% відповідає  $\approx 750$  л пального на авто та  $\approx 1,7$  т  $\text{CO}_2$ /рік. Для дизельних НСV (30 л/100 км, 60 тис. км/рік) економія 10% дає  $\approx 1\,800$  л і  $\approx 4,8$  т  $\text{CO}_2$  на машину/рік — у межах інвентаризаційних підходів [4–6].

Ефект залежить від якості трафік-профілів і погодних умов; холодний старт і низькі температури збільшують викиди, що слід враховувати для міських коротких поїздок [9].

Для електромобілів критерії слід переформулювати у «споживання енергії/деградація АКБ»; локальні політики «зон низьких викидів» можуть вимагати пріоритезації  $\text{NO}_x/\text{PM}$  для дизельних ТЗ [2; 5].

## Висновки

1) Запропоновано AI-eco-routing з інтеграцією трафіку та рельєфу, що суттєво скорочує витрату палива і викиди  $\text{CO}_2$  при контрольованому ЕТА та дотриманні інфраструктурних обмежень [1; 7–9].

2) Гібридна енергетично-емісійна модель, калібрована на телематичі й верифікована за HBEFA/COPERT/MOVES, забезпечує пояснюваність і переносимість між регіонами/парками [3–6; 9].

3) Багатокритеріальна оптимізація з ймовірнісним ЕТА та онлайн-переплануванням робить підхід практичним для логістики з SLA; подальша робота — персоналізація ваг (паливо/ $\text{NO}_x/\text{PM}$ /шум), розширення на гібриди/EV і урахування погоди/стану покриття [2; 7].

## Література

1. Barth M., Boriboonsomsin K. Real-world carbon dioxide impacts of traffic congestion // *Transportation Research Record*. — 2008. — 2058. — С. 163–171.
2. Demir E., Bektaş T., Laporte G. A review of recent research on green road freight transportation // *European Journal of Operational Research*. — 2014. — 237(3). — С. 775–793.

3. Rakha H., Ahn K., Trani A. VT-Micro model for estimating hot stabilized light duty vehicle and truck emissions // Transportation Research D. — 2004. — 9(1). — С. 49–74.
4. HBEFA. Handbook Emission Factors for Road Transport, версії 3.x/4.x. — Bern: INFRAS.
5. COPERT 5. Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport. — European Environment Agency/EMISIA, чинне вид.
6. EPA MOVES3. Motor Vehicle Emission Simulator. — Washington, DC: U.S. EPA.
7. Osorio C., Chong L. A dynamic network optimization formulation for eco-routing with probabilistic travel times // Transportation Science. — 2015. — 49(3). — С. 553–566.
8. Zhang R., Yao E., Wang X. Eco-routing based on vehicle dynamics and road grade // Transportation Research Part D. — 2015. — 34. — С. 176–184.
9. Frey H. C., Roupail N., Zhai H. Speed and facility specific emissions for light-duty vehicles // Transportation Research Record. — 2008. — 2058. — С. 52–62.
10. OpenStreetMap Wiki. Highway and traffic tagging schemes. — OSM Foundation.

УДК 621.431

## **ВИКОРИСТАННЯ ЧИСЛОВИХ ПРОФІЛІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ У ДЛЯ АНАЛІЗУ ДИНАМІЧНИХ СИЛ, ЩО ДІЮТЬ У КРИВОШИПНО-ШАТУННОМУ МЕХАНІЗМІ**

**Рудь Артем Вадимович**, магістрант, Первомайський навчально-науковий інститут національного університету кораблебудування  
**Рудь Вадим Миколайович**, магістрант, Первомайський навчально-науковий інститут національного університету кораблебудування  
**Штефанко Станіслав Михайлович**, магістрант, Первомайський навчально-науковий інститут національного університету кораблебудування  
**Білоусов Євген Вікторович**, д.т.н., проф. Одеський національний морський університет, професор кафедри суднових технічних систем та комплексів  
**Крюков Артем Юрійович**, магістрант, Первомайський навчально-науковий інститут національного університету кораблебудування, e-mail: [artelkryukov@tuta.io](mailto:artelkryukov@tuta.io)

У практиці експлуатації суднових двигунів внутрішнього згоряння поширення отримав метод порівняння індикаторних діаграм робочого процесу, знятих з двигуна під час планового обстеження, з еталонними індикаторними діаграмами. Традиційно зняття індикаторних діаграм проводилося під час ходу судна на режимі близькому до номінальної комерційної потужності двигуна.