

ДИНАМІЧНА МАРШРУТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ У МІСТАХ НА БАЗІ СИНЕРГЕТИЧНОГО ПІДХОДУ

Данчук В.Д., доктор фізико-математичних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, vdanchuk@ukr.net, orcid.org/0000-0003-3936-4509

Сватко В.В., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, vsvatko83@gmail.com, orcid.org/0000-0002-0712-5688

Рудоман Н.В., Національний транспортний університет, Київ, Україна, nadiiarudoman@ukr.net, orcid.org/0000-0002-7923-8649

DYNAMIC ROUTING OF CARGO DELIVERY PROCESSES IN CITIES BASE ON SYNERGETIC APPROACH

Danchuk V.D., Dr. Sc. (Phys.-Math.), National Transport University, Kyiv, Ukraine, vdanchuk@ukr.net, orcid.org/0000-0003-3936-4509

Svatko V.V., Ph.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine, vsvatko83@gmail.com, orcid.org/0000-0002-0712-5688

Rudoman N.V., National Transport University, Kyiv, Ukraine, nadiiarudoman@ukr.net, orcid.org/0000-0002-7923-8649

Постановка проблеми. Однією із найбільш гострих проблем в сучасних умовах є відставання темпів розвитку вулично-дорожньої мережі (ВДМ) від реальних потреб міста. Зростання рівня автомобілізації у містах призводить до інтенсифікації дорожнього руху, зменшенню швидкості руху транспортних потоків, виникнення заторів. В свою чергу, це суттєво впливає на навантаження транспортних мереж міст, резерви пропускної здатності яких на сьогодні часто є вичерпаними. Тривалі затори на дорогах все частіше стають причиною не лише часових, але й економічних втрат.

Найбільш перспективним напрямком вирішення цих проблем є розробка, впровадження і застосування інтелектуальних транспортних систем (ІТС). У таких умовах особлива увага повинна приділятися розробці сучасних методів та моделям раціональної організації і управління дорожнім рухом як методологічної бази створення ІТС. Однією з важливих задач, які повинні вирішуватись при застосуванні ІТС, є ефективне управління процесом динамічної маршрутизації вантажних перевезень в режимі реального часу з урахуванням реальної динаміки транспортних потоків на міській ВДМ. При вирішенні такої задачі актуальним є розробка сучасних підходів, моделей та методів, а також проведення імітаційного моделювання оптимізації процесів доставки вантажів в умовах реальної динаміки транспортних потоків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день існує велика кількість статей, які присвячені розробці та застосуванню різних класичних методів для розв'язання задач дискретної оптимізації маршрутів транспортних перевезень в містах. Як показує аналіз, більшість методів, наведених в цих статтях, не є досконалими і не дають однозначних рішень [1-5].

В останні роки, більш перспективними для вирішення задач маршрутизації різної фізичної природи можна вважати застосування методів еволюційного програмування, в першу чергу це стосується генетичного алгоритму [6-8] та методу, що базується на ефектах самоорганізації мурашиних агентів [9]. Порівняльний аналіз цих методів вказує на ряд обмежень при використанні генетичного алгоритму [10-11]. Зокрема, застосування генетичного алгоритму призводить до отримання більш коректних результатів у випадку розв'язку задач маршрутизації високої розмірності. Це не завжди є застосовним для вирішення транспортних проблем міста. Так, наприклад, задача доставки дрібносерійного вантажу в межах мегаполіса часто містить 10-50 пунктів призначення. Відповідно, класичний мурашиний алгоритм [9] дає значно кращі результати для задач оптимізації з розмірністю до 100 точок [10-11].

Поряд с цим, слід зазначити, що існуючі на сьогоднішній день методи та моделі оптимізації маршруту транспортних перевезень в основному вирішують задачі маршрутизації для стаціонарних станів транспортної мережі, коли швидкості на ділянках таких мереж не змінюються.

В [12] запропоновано метод оптимізації маршруту транспортних перевезень на базі модифікованого мурашиного алгоритму з урахуванням зміни швидкості руху транспортних потоків на певних ділянках ВДМ. Тут, принциповою відмінністю [12] від існуючих на сьогоднішній день

модифікацій мурашиного алгоритму [13-15] є те, що циклічний рух колонії, де мурахи рухаються із сталими швидкостями замінено на асинхронний рух кожної мурахи з певною швидкістю. Це дозволяє проводити імітаційні моделювання оптимізації маршруту в умовах реальної динаміки транспортних потоків на ділянках мережі, де мурашині агенти, як аналоги транспортних засобів, рухаються із відповідними швидкостями.

Проте в [12] при проведенні моделювання процесів оптимізації маршрутів швидкість транспортного потоку на певних ділянках ВДМ зменшувалась лінійно без врахування особливостей динаміки транспортних потоків в області високої щільності.

Необхідно визнати, що в останні роки спостерігається бурхливий розвиток теоретичних уявлень, моделей, методів щодо опису нелінійних нерівноважних дисипативних процесів та явищ, які відбуваються в системах різної фізичної природи, наприклад, в області фазових переходів молекулярних кристалів, самоорганізації діяльності підприємства під впливом зовнішніх стохастичних та детермінованих змін чинників нелінійного ринкового середовища (дивись, наприклад, [16-17]). Одним з основних підходів, що застосовується для опису таких процесів, є синергетичний підхід, який базується на принципах самоорганізації.

Проте, до цього часу проблемам розробки синергетичних уявлень нестационарної динаміки в області щільного транспортного потоку не приділялось достатньої уваги. Тут, можна навести роботу [18], де вперше запропоновано теорію фазового переходу від фази вільного потоку до фази щільного транспортного потоку в рамках синергетичної моделі Лоренца. Однак, в рамках цієї теорії питання визначення теоретичної залежності швидкості транспортного потоку від щільності завантаження ВДМ залишилось відкритим [18].

Метою цієї роботи є проведення в рамках синергетичного підходу імітаційного моделювання процесів оптимізації маршрутів доставки вантажів з урахуванням нестационарної динаміки транспортного потоку на ділянках міської ВДМ. Тут дискретна оптимізація маршрутів здійснюється за допомогою модифікованого алгоритму самоорганізації мурашиної колонії [12]. При цьому, аналітичні залежності зміни швидкості транспортного потоку від характерного часу та щільності завантаженості на ділянках ВДМ визначається в рамках синергетичної моделі Лоренца.

Синергетичний підхід щодо оптимізації маршрутів на міських ВДМ в умовах нестационарної динаміки транспортних потоків. В [19] експериментально показано, що виникнення щільного транспортного потоку відбувається в результаті фазового переходу першого роду від режиму вільного руху до режиму синхронізованого руху транспортного потоку і далі руху широкого кластеру автомобілів. Подальше збільшення щільності транспортного потоку призводить до виникнення заторів. В [5,19] в рамках теорії клітинних автоматів наведена теоретична інтерпретація залежності швидкості від щільності транспортного потоку. Однак, ці теоретичні уявлення не дають задовільних результатів руху автомобілів в області щільного транспортного потоку.

В [18] вперше представлено в рамках моделі Лоренца синергетичний підхід для опису фазового переходу між різними режимами динаміки транспортного потоку. Цей перехід має властивість фазового переходу рідина-пар, де вільний та ускладнений рух автомобілів відповідає паровій та рідкій фазам. Перехід між відповідними станами відбувається, коли щільність автомобілів досягає критичного значення. Транспортний потік зі збільшеною щільністю та нестійкою однорідною частиною супроводжується виникненням затору на ВДМ. В даній роботі, на відміну від [18], наводиться теоретичний опис нестационарної динаміки транспортного потоку в рамках синергетичної моделі Лоренца з урахуванням динамічних габаритів транспортних засобів, що є найбільш характерними для певного транспортного потоку, який формується на певній ділянці ВДМ у певний проміжок часу.

Такі транспортні засоби в цій роботі розглядаються в рамках концепції ефективного автомобіля. За своєю суттю ефективний автомобіль – це модельний елемент системи, який описує транспортний рух в рамках певної мікроскопічної моделі. Він має техніко-експлуатаційні параметри транспортного засобу, які є найбільш характерними для транспортного потоку, що формується на певній ділянці ВДМ у певному проміжку часу. При цьому враховується його взаємодія з іншими транспортними засобами як учасниками формування цього транспортного потоку.

Отже, згідно [18] перехід між режимами транспортного потоку уявляється як фазовий перехід першого роду, характер якого визначається відстанню між автомобілями $\Delta x(t)$, що відіграє роль об'єму чи щільності, та оберненим часом затримки (часом розгону/гальмування) $1/\tau$, що відповідає температурі. Для опису використовується рівняння руху n -го автомобіля:

$$dx_n/d(t + \tau) = v(\Delta x_n(t)) \quad (1)$$

Тут задається оптимальна швидкість $v(\Delta x_n(t))$, яка задовольняє наступним вимогам:

- $v(\Delta x_n)$ – монотонно зростаюча функція;
- має верхню межу;
- при інтервалі між автомобілями, що рівний критичному значенню h_c , має точку налаштування.

В процесі досліджень даної моделі отримано умову стійкості, згідно якої при появі незначного впливу в однорідному потоці автомобілів, він залишається стабільним, якщо час затримки відповідає нерівності

$$1/\tau > 2v'(h), \quad (2)$$

де $v'(h) = dv(\Delta x_n)/d\Delta x_n|_{\Delta x_n = h}$

Для найпростішої моделі автомобілів, що рухаються один за одним величини

$$\eta = h - \Delta x, \quad \Delta x = h - \eta, \quad (3)$$

де η – відхилення від оптимального значення інтервалу між транспортними засобами;

Δx – реальне значення відстані між транспортними засобами;

h – оптимальне значення інтервалу між транспортними засобами.

$$v = \Delta \dot{x} = h/t_0 - v_0, \quad v = \Delta \dot{x} = -\dot{\eta} \quad (4)$$

де v -- швидкість відхилення від оптимального значення інтервалу між транспортними засобами;

$\Delta \dot{x}$ – реальне значення швидкості відхилення від оптимального значення інтервалу між транспортними засобами.

Відхилення інтервалу між транспортними засобами та швидкості його зміни від відповідних оптимальних значень h та $h/t_0 - v_0$ (t_0 - характерний часовий інтервал, v_0 - швидкість автомобіля) відіграють роль параметру порядку та спряженого поля відповідно. Таким чином, поведінка транспортного потоку характеризується величинами η , v та часом розгону/гальмування τ , що зводиться до управляючого параметру. Нехай вказані величини є дисипативними, і їх релаксація до рівноважних значень описується рівнянням Дебая. Основою синергетичного підходу є те, що позитивний зворотній зв'язок між змінними η і τ може призвести до самоорганізації системи, яка є причиною переходу між режимами транспортного потоку. Для забезпечення стабільності системи введемо від'ємний зворотній зв'язок між η та v . Отримані в результаті рівняння, що визначають часові залежності $\eta(t)$, $v(t)$ та $\tau(t)$, формально співпадають з системою Лоренца, яка описує систему, що самоорганізовується [2]:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = -\eta/t_\eta + v, \\ \dot{v} = -v/t_v + g_v \eta \tau, \\ \dot{\tau} = (\tau_0 - \tau)/t_\tau - g_\tau \eta v \end{cases} \quad (5-7)$$

Тут крапка означає диференціювання по часу; t_η, t_v, t_τ - відповідно часи релаксації; g_v, g_τ - додаткові константи зв'язку між динамічними змінними. Рівняння (5) – (7) є основою самоузгодженого опису моделі автомобілів, що рухаються один за одним. Суттєвою особливістю даної моделі є те, що у (6) – (7) входять нелінійні складові з різними знаками, в той час як рівняння (5) – лінійне. Останнє обумовлено тим, що відхилення швидкості v є похідною відхилення інтервалу η по часу. Друга складова в правій частині (6) описує додатний зворотній зв'язок між відхиленням інтервалу та часу розгону/гальмування, в результаті чого збільшується значення v , що є причиною виникнення транспортного затору. Кінетичне рівняння для величини τ відрізняється тим, що релаксація відбувається не до нуля, а до кінцевого значення τ_0 , що визначає час, необхідний автомобілю для досягнення характерної швидкості (техніко-експлуатаційна характеристика транспортного засобу). Знак мінус перед останнім елементом в правій частині рівняння (7) можна розглядати як виникнення принципу Ле-Шательє, оскільки збільшення часу розгону/гальмування τ призводить до виникнення потоку машин, при чому ріст величин η і v заважає збільшенню τ .

Стаціонарне значення відхилення інтервалу η має вигляд:

$$\eta_e^m = \eta_{00} \left\{ 1 \pm [1 + \eta_0^2 \eta_{00}^{-4} (\tau_0 - \tau_c)]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}} \\ 2\eta_{00}^2 = (\tau_0 - 1) - \tau_c \eta_0^2, \quad \tau_c = 1 + k \quad (8)$$

Верхній знак в правій частині рівняння (8) відповідає значенню η^m для нестійкого стану, а нижній знак відповідає стійкому стану η_e . Відповідне значення стаціонарного часу розгону/гальмування

$$\tau^m = \frac{1 + \eta_{00}^2 + \sqrt{(1 + \eta_{00}^2)^2 - (1 - \eta_0^2)^2 \tau_0}}{1 - \eta_0^2} \quad (9)$$

що плавно зростає від значення

$$\tau_m = 1 + \eta_0 \sqrt{k/(1 - \eta_0^2)} \quad (10)$$

при

$$\tau_0 = \tau_{c0} = (1 - \eta_0^2) \tau_m^2 \quad (11)$$

до граничного значення $\tau_c = 1 + k$ при $\tau_0 = \tau_c$.

Згідно (4) легко знайти швидкість автомобіля v у синхронізованому режимі, коли існує взаємодія між транспортними засобами, що призводить до формування транспортного затору. При цьому значення швидкості обумовлене проявом синергетичних ефектів, які описуються системою рівнянь (5–7).

$$v = \eta_e^m = \frac{1}{4 \sqrt{\eta_{00}^2 \mp \sqrt{\eta_{00}^4 + \eta_0^2 (\tau_0 - \tau_c)}}} (1 \mp \frac{\eta_0^2 - \eta_{00}^2}{\sqrt{\eta_{00}^4 + \eta_0^2 (\tau_0 - \tau_c)}}) \quad (12)$$

Верхній знак в правій частині рівняння (12) відповідає значенню для нестійкого стану, а нижній знак відповідає стійкому стану.

На основі отриманих розрахунків побудуємо залежності стаціонарного значення відхилення від оптимального значення інтервалу між транспортними засобами η_e^m та швидкості v від значення τ_0 , що визначає час, необхідний автомобілю для досягнення характерної швидкості. Значення η_e^m, v, τ_0 , наведені у відносних одиницях.

Одним з найголовніших показників, що характеризує завантаженість транспортної мережі є щільність транспортного потоку ρ , яка визначається як кількість транспортних засобів, що знаходяться в даний момент часу на заданій ділянці дороги. Максимальне значення щільності ρ_{max} відповідає кількості нерухомих транспортних засобів розташованих впритул один до одного. Виходячи з цього, можна визначити залежність між щільністю та реальною відстанню між транспортними засобами за наступною формулою:

$$\rho \sim \frac{1}{\Delta x} \quad (13)$$

де ρ - щільність завантаження транспортної мережі;

Δx - реальні відстані між транспортними засобами.

Оскільки, згідно (3) $\Delta x = h - \eta$ маємо:

$$\rho \sim \frac{1}{h - \eta} \quad (14)$$

Крім того, розглядаючи модель ефективного автомобіля як ефективну характеристику транспортного засобу реального транспортного потоку, можна описувати динаміку фазових переходів транспортного потоку в теорії Кернера в рамках синергетичного підходу, розвинутого в даній роботі.

Тоді, використовуючи формули (12), (14), можна побудувати залежність швидкості руху транспортного потоку v від показників завантаженості дорожньо-транспортної мережі ρ .

Як показано у [20] швидкість транспортного потоку залишається незмінно високою до досягнення певного значення щільності транспортного потоку на певній ділянці транспортної мережі (в нашому випадку до значення $\rho = 0.655$). В цій точці відбувається фазовий перехід від вільного режиму руху транспортних засобів до синхронізованого режиму. Тут швидкість транспортного потоку починає різко зменшуватись при збільшенні щільності транспортного потоку. При досягненні критичного значення щільності (в нашому випадку до значення $\rho = 0.731$) значення швидкості транспортного потоку наближається до нуля і далі практично не змінюється. Цей стан відповідає стану руху широкого кластеру. При певних умовах швидкість може зменшуватись до нуля, що відповідає стану транспортного затору.

Метод оптимізації маршруту доставки вантажів, що базується на ефекті самоорганізації мурашиної колонії. Згідно [12] ВДМ будемо представляти у вигляді двонаправлено орієнтованого зваженого графа. У вузлах такого графа розташовані пункти доставки товару (склади, супермаркети, тощо) зі складу відправника за допомогою транспортного засобу, що рухається у ВДМ міста. Фізичний сенс ваг ребер, які з'єднують певну пару вузлів графа, залежить від характеру розв'язуваної задачі. Це можуть бути відстані між пунктами, середні швидкості або середній час, вартість проїзду транспортного засобу в транспортному потоці на певних ділянках мережі. Оптимізація маршрутів руху транспортного засобу здійсню в рамках задачі комівояжера за допомогою алгоритму самоорганізації мурашиної колонії [9]. Ця задача формулюється як задача пошуку мінімального за певним параметром замкнутого маршруту по всіх вершинах, які відвідує комівояжер, без повторень на певному зваженому графі з кількістю вершин m та кількістю ребер n . Тут параметрами оптимізації можуть бути довжина маршруту, середня швидкість або середній час, вартість проїзду за маршрутом. Для зручності будемо вважати, що місце виїзду та повернення транспортного засобу може відбуватись з будь-якого вузла графа.

Для вирішення задач маршрутизації з урахуванням можливості розгляду реальної поведінки транспортного потоку (виникнення заторів, ремонту доріг, аварійних ситуацій тощо) будемо розглядати динамічний двонаправлено орієнтований зважений граф. Ваги ребер в цьому графі визначаються середнім часом проїзду транспортного засобу в транспортному потоці на певних ділянках мережі між пунктами доставки (вузлами графа). Крім того, в класичний алгоритм мурашиної колонії вносяться відповідні модифікації згідно [12].

Застосування такого модифікованого методу мурашиного алгоритму для оптимізації маршруту доставки товару з урахуванням динаміки транспортного потоку здійснюється при наступних припущеннях:

- на всіх ділянках ВДМ рух виділеного транспортного засобу здійснюється в рамках двосмугового двостороннього транспортного потоку;
- у кожній сукупності n_j ділянок ВДМ, що відповідає j -му ребру графу, завжди знайдуться альтернативні варіанти проїзду;
- зміна середнього часу проїзду та середньої швидкості проїзду в основному залежать від змін режимів динаміки транспортного потоку, які не включають в себе зупинки або затримки через дії регулюючих сигналів світлофорів.

Кожен маршрут між точкою відправки і точкою доставки товару в межах транспортної мережі має певну кількість альтернатив. Це означає, що доставити вантаж з однієї точки до іншої можна декількома маршрутами, які відрізняються лише довжиною та середньої швидкістю транспортного потоку на них. В нашому випадку будемо вважати, що середній час проходження по n -му ребру між двома вузлами графу знаходиться наступним чином:

$$t_n = \frac{l_n}{v_n}, \quad (15)$$

де t_n – середній час, витрачений на проходження n -го ребра, год;

l_n – довжина n -го ребра, км;

v_n – середня швидкість транспортного потоку по n -му ребру, км/год.

Оскільки значення реальної швидкості руху транспортних потоків на кожній ділянці дорожньо-транспортної мережі може змінюватись, то відповідно, значення часу проходження шляху відповідних ділянок ВДМ також є змінною величиною. Отже, при побудові оптимального за часом маршруту доставки вантажів враховується інформація про реальний стан ВДМ на момент побудови маршруту.

При цьому, зрозуміло, що при деяких граничних значеннях швидкості руху транспортного потоку на певних ділянках ВДМ можлива перебудова оптимального за часом маршруту руху на ВДМ транспортного засобу для доставки товару у пункти призначення.

Синергетичний метод оптимізації маршруту доставки товарів на міській ВДМ з урахуванням нестационарної динаміки транспортного потоку на її ділянках, що пропонується в цій роботі, полягає в наступному. Спочатку визначаються параметри пункту відправки та пунктів доставки товарів на відповідній ВДМ міста або на її фрагменті. Далі проводяться експериментальні спостереження залежності щільності транспортного потоку від часу на ділянках мережі за обраний проміжок часу. Потім, використовуючи аналітичні залежності швидкості транспортного потоку від щільності (12) – (14), що отримані в рамках синергетичної моделі Лоренца, визначаються швидкості транспортного потоку на цих ділянках в певні моменти часу спостереження. Після цього проводять імітаційні моделювання процесів оптимізації маршруту в залежності від швидкостей транспортних потоків на ділянках ВДМ згідно модифікованого мурашиного алгоритму [20].

Таким чином, при побудові оптимального за часом маршруту доставки вантажів враховується інформація про реальний стан ВДМ на момент побудови маршруту. При цьому, зрозуміло, що при певних значеннях швидкості руху транспортного потоку на певних ділянках ВДМ можлива перебудова оптимального за часом маршруту руху на ВДМ транспортного засобу для доставки товару у пункти призначення.

Застосування методу на прикладі ВДМ м. Києва. Результати імітаційного моделювання та їх обговорення. Для проведення процесу моделювання процесів оптимізації маршруту доставки товарів було обрано місто Київ. Такий вибір обумовлений декількома факторами:

- велика кількість торгових точок (покупців, магазинів, торгових центрів тощо);
- наявність розгалуженої дорожньо-транспортної мережі;
- висока інтенсивність та щільність транспортних потоків на більшості ділянок ВДМ;
- висока ймовірність виникнення заторів на ділянках з великою щільністю транспортних потоків;
- наявність засобів фіксації транспортних потоків (камер відеоспостереження в режимі реального часу) та відкритий доступ до них;
- можливість порівнювати результати моделювання з експериментальними даними.

Було визначено 20 пунктів доставки вантажів, що розташовані у декількох районах міста Києва. Цими районами є Дарницький, Деснянський та Печерський райони. Інформацію про торгові точки та адреси їх розташування наведено у [20].

Будемо вважати, що послідовність проходження вказаних точок визначається часом їх обходу. Середній час руху на кожній ділянці мережі визначається згідно (15). Побудова оптимального маршруту обходу всіх 20 пунктів доставки з врахуванням реальної динаміки транспортних потоків в певний момент часу здійснювалась згідно методу, що описаний у [20].

Вихідними даними для моделювання були відстані між пунктами та часи руху транспортного потоку на кожній ділянці ВДМ, що отримано для вільного руху транспортних засобів на цих ділянках. При цьому швидкості на ділянках вибирались максимальними, які відповідали значенням дорожніх знаків обмеження швидкості (50 км/год.). Ці дані наведені в [20].

Критерієм оптимізації обрано час маршруту доставки вантажу до всіх обраних торгових пунктів. Використовуючи модифікований мурашиний алгоритм, було знайдено оптимальний за часом маршрут доставки вантажів для 20 торгових пунктів для вихідних даних моделювання. Цей оптимальний маршрут має наступний вигляд: 10 - 9 - 5 - 7 - 4 - 6 - 3 - 2 - 1 - 12 - 15 - 14 - 19 - 20 - 18 - 16 - 17 - 11 - 13 - 8 - 10 (нумерація торгових точок відповідає нумерації, наведеній в [20]). В цьому випадку час доставки вантажів складає 86.2 хв, а довжина маршруту становить – 71.65 км.

Для проведення імітаційного моделювання процесів побудови оптимального маршруту в умовах, наближених до реального стану ВДМ, було обрано три ділянки ВДМ, на яких проводились експериментальні спостереження залежності щільності транспортного потоку від часу протягом доби. Це такі ділянки (рисунок 1):

- Північний міст в обидва напрями (ділянка ВДМ 14 – 19);
- метро Дружби народів – міст Патона (ділянка ВДМ 17 – 11);
- перетин вулиці Братиславська та проспекту Лісовий в обидва напрями (ділянка ВДМ 13 – 8).



Рисунок 1 – Досліджувані ділянки ВДМ м. Києва: а) метро Дружби народів – міст Патона; б) Північний міст; в) вулиця Братиславська – проспект Лісовий
 Figure 1 – The investigated sections of the Kyiv urban road network: a) metro Druzhby Narodov - Paton Bridge; b) North Bridge; c) Bratislavskaya Street - Lesnaya Avenue

Обрання вказаних ділянок для модельного дослідження обумовлено тим, що вони входять до визначеного при вільному русі початкового оптимального маршруту, а також великою їх завантаженістю, частим виникненням транспортних заторів та ускладнень руху протягом доби, що призводить до суттєвого зменшення швидкості руху транспортних потоків на них.

Кожна із обраних ділянок має певні особливості у своїх характеристиках. Так, ділянка ВДМ м. Києва метро Дружби народів – міст Патона в обидва напрями має по 3 смуги руху транспортних потоків та одну смугу руху громадського транспорту. Крім того, на вказаній ділянці передбачене світлофорне регулювання. На ділянці ВДМ Північний міст в обидва напрями передбачено по три смуги руху транспортних потоків та одна смуга для руху громадського транспорту в кожному напрямі. Додаткових обмежень на вказаній ділянці не встановлено, світлофорне регулювання відсутнє. Ділянка ВДМ на перетині вулиці Братиславська та проспекту Лісовий має по три смуги руху транспортних потоків автомобілів та одну смугу для руху громадського транспорту в кожному напрямі. На вказаній ділянці передбачене світлофорне регулювання.

Під час дослідження протягом 5 діб з інтервалом 1 хвилина відбувались щодобові спостереження за кількістю транспортних засобів, що заповнюють відповідні ділянки ВДМ в певні моменти часу доби. Отже, середні значення кількості автомобілів для певних моментів часу визначались за п'ятьма вимірюваннями. Отримані дані в подальшому використовувались для розрахунку таких показників транспортного потоку як середня інтенсивність та середня щільність. Далі згідно до (12) – (14) для певних моментів часу доби визначались середні швидкості транспортних потоків в залежності від показників середньої щільності на вказаних ділянках ВДМ. Відносна похибка вимірювання для всіх зазначених показників не перевищувала 7% – 10%. На всіх інших ділянках ВДМ під час спостереження швидкості транспортних потоків вважались рівними 50 км/год.

Отримані залежності середньої щільності транспортних потоків від часу доби на досліджуваних ділянках ВДМ протягом доби, наведено у [20].

Далі, на підставі отриманих даних середньої щільності транспортних потоків на досліджуваних ділянках ВДМ в певні моменти часу доби визначались відповідні швидкості транспортних потоків на цих ділянках згідно з (12) – (14).

При проведенні моделювання було виявлено низку ефектів (Табл.1). Ці ефекти пов'язані з перебудовою оптимальних маршрутів при зменшенні середніх швидкостей руху транспортних засобів на модельних ділянках ВДМ до певних граничних значень, які відповідають певним режимам руху транспортних потоків.

Так, протягом доби в діапазонах від 00:00 до 07:05; від 08:50 до 09:15; від 10:00 до 17:10; 17:20; від 22:00 до 24:00 щільність транспортних потоків на досліджуваних ділянках менше 0.6, що відповідає вільному руху транспортного потоку. Оптимальний маршрут при цьому має вигляд: 10 - 9 - 5 - 7 - 4 - 6 - 3 - 2 - 1 - 12 - 15 - 14 - 19 - 20 - 18 - 16 - 17 - 11 - 13 - 8 - 10, час проходження маршруту 86.2 хв, а його довжина – 71.65 км. Отримані параметри для цих станів ВДМ, що зрозуміло, повністю збігаються з вихідними даними, наведеними вище. Такий же оптимальний маршрут ми спостерігаємо і о 07:10 та 21:00, хоча тут на ділянці 17 – 11 (метро Дружби народів – міст Патона) автомобілі рухаються у синхронізованому режимі (Табл.1). Це призводить тільки до певного збільшення часу маршруту (87.8 min) за рахунок зменшення швидкості на цій ділянці до 43 км/год.

Таблиця 1 – Результати імітаційного моделювання процесів побудови оптимального маршруту доставки товарів в залежності від реальної динаміки транспортних потоків на ділянках ВДМ м. Києва
 Table 1 – Results of simulation of processes of building of the optimal route of delivery of goods depending on real dynamics of transport flows on sections of the Kyiv urban road network

Час доби, год	14-19		17-11		13-8		Маршрут	Час, хв	Довж-на, км
	v , км/год	ρ , (в.од.)	v , км/год	ρ , (в.од.)	v , км/год	ρ , (в.од.)			
00:00-07:05	50	<0.6	50	<0.6	50	<0.6	10 - 9 - 5 - 7 - 4 - 6 - 3 - 2 - 1 - 12 - 15 - 14 - 19 - 20 - 18 - 16 - 17 - 11 - 13 - 8 - 10	86.2	71.65
07:10	50	0.6	43	0.66	50	0.5	10 - 9 - 5 - 7 - 4 - 6 - 3 - 2 - 1 - 12 - 15 - 14 - 19 - 20 - 18 - 16 - 17 - 11 - 13 - 8 - 10	87.8	71.65
07:15	30	0.67	23	0.68	50	0.63	3 - 6 - 9 - 7 - 10 - 12 - 13 - 15 - 14 - 2 - 5 - 1 - 11 - 16 - 17 - 18 - 19 - 20 - 8 - 4 - 3	88.7	73.8
07:20-08:05	18	>0.69	13	>0.7	13	>0.7	13 - 6 - 10 - 5 - 4 - 3 - 8 - 9 - 7 - 2 - 11 - 12 - 14 - 15 - 20 - 18 - 19 - 16 - 17 - 1 - 13	89.2	74.3
08:10-08:45	50	<0.6	50	<0.6	13	>0.7	8 - 2 - 4 - 10 - 7 - 5 - 12 - 13 - 15 - 14 - 18 - 19 - 20 - 16 - 17 - 9 - 11 - 1 - 3 - 6 - 8	88.1	73.25
08:50-09:15	50	<0.6	50	<0.6	50	<0.6	10 - 9 - 5 - 7 - 4 - 6 - 3 - 2 - 1 - 12 - 15 - 14 - 19 - 20 - 18 - 16 - 17 - 11 - 13 - 8 - 10	86.2	71.65
09:20	50	<0.6	50	<0.6	23	0.68	1 - 2 - 5 - 7 - 13 - 12 - 14 - 4 - 8 - 6 - 3 - 9 - 10 - 15 - 20 - 19 - 18 - 16 - 17 - 11 - 1	87.7	72.9
09:25	50	<0.6	50	<0.6	3	0.79	8 - 2 - 4 - 10 - 7 - 5 - 12 - 13 - 15 - 14 - 18 - 19 - 20 - 16 - 17 - 9 - 11 - 1 - 3 - 6 - 8	88.1	73.25
09:30-09:40	50	<0.6	50	<0.6	15	>0.7	1 - 2 - 5 - 7 - 13 - 12 - 14 - 4 - 8 - 6 - 3 - 9 - 10 - 15 - 20 - 19 - 18 - 16 - 17 - 11 - 1	87.7	72.9
09:45-09:55	50	<0.6	50	<0.6	3	0.8	8 - 2 - 4 - 10 - 7 - 5 - 12 - 13 - 15 - 14 - 18 - 19 - 20 - 16 - 17 - 9 - 11 - 1 - 3 - 6 - 8	88.1	73.25
10:00-17:10	50	<0.6	50	<0.6	50	<0.6	10 - 9 - 5 - 7 - 4 - 6 - 3 - 2 - 1 - 12 - 15 - 14 - 19 - 20 - 18 - 16 - 17 - 11 - 13 - 8 - 10	86.2	71.65
17:15	50	<0.6	3	0.9	50	<0.6	8 - 2 - 4 - 10 - 7 - 5 - 12 - 13 - 15 - 14 - 18 - 19 - 20 - 16 - 17 - 9 - 11 - 1 - 3 - 6 - 8	88.1	73.25
17:20	50	<0.6	50	<0.6	50	<0.6	10 - 9 - 5 - 7 - 4 - 6 - 3 - 2 - 1 - 12 - 15 - 14 - 19 - 20 - 18 - 16 - 17 - 11 - 13 - 8 - 10	86.2	71.65
17:25	50	<0.6	50	<0.6	3	0.79	8 - 2 - 4 - 10 - 7 - 5 - 12 - 13 - 15 - 14 - 18 - 19 - 20 - 16 - 17 - 9 - 11 - 1 - 3 - 6 - 8	88.1	73.25
17:30-20:00	50	<0.6	3	<0.73	50	<0.6	8 - 2 - 4 - 10 - 7 - 5 - 12 - 13 - 15 - 14 - 18 - 19 - 20 - 16 - 17 - 9 - 11 - 1 - 3 - 6 - 8	88.1	73.25
21:00	50	<0.6	43	0.66	50	<0.6	10 - 9 - 5 - 7 - 4 - 6 - 3 - 2 - 1 - 12 - 15 - 14 - 19 - 20 - 18 - 16 - 17 - 11 - 13 - 8 - 10	87.8	71.65
22:00-24:00	50	<0.6	50	<0.6	50	<0.6	10 - 9 - 5 - 7 - 4 - 6 - 3 - 2 - 1 - 12 - 15 - 14 - 19 - 20 - 18 - 16 - 17 - 11 - 13 - 8 - 10	86.2	71.65

*сірим фоном відмічені значення швидкості v та щільності транспортного потоку на модельних ділянках ВДМ, які відповідають щільному стану завантаженості транспортної мережі

Динаміку зміни часу та довжини проходження оптимального маршруту протягом доби наведено відповідно на рис. 2 та рис. 3.



Рисунок 2 – Динаміка зміни часу проходження оптимального маршруту протягом доби
Figure 2 – Dynamics of change of time of passing of an optimum route during the day



Рисунок 3 – Динаміка зміни довжини оптимального маршруту протягом доби
Figure 3 – Dynamics of change in the length of the optimal route during the day

Принципово змінюється ситуація в інші інтервали доби. Тут інтенсивність руху на певних модельних ділянках досліджуваної ВДМ суттєво збільшується. В деяких випадках рух транспортних потоків здійснюється не тільки у синхронізованому режимі, але й в режимі руху широкого кластера, виникнення затору (Табл.1). Це призводить до суттєвого зменшення швидкості на цих ділянках ВДМ і, відповідно, до перебудови конфігурації оптимального маршруту загалом. При цьому, з нових конфігурацій оптимального маршруту вилучаються деякі або всі модельні ділянки ВДМ: 14-19 (Північний міст), 17-11 (метро Дружби народів – міст Патона), 13 – 8 (перетин вулиці Братиславська та проспекту Лісовий) (дивись таблицю 3).

Так, наприклад, в інтервалі часу від 09:30 до 09:40 щільність транспортного потоку на ділянці 13 – 8 ВДМ стає більшою за 0.7, що відповідає режиму руху широкого кластера на цій ділянці, при вільному русі автомобілів на інших ділянках ВДМ (Табл.1). Розрахунки згідно запропонованого методу показують, що тут відбувається перебудова оптимального маршруту доставки товару так, що з нього вилучаються дві модельні ділянки ВДМ 14-19 та 13-8. У наступний проміжок часу спостереження від 09:45 до 09:55 щільність транспортного потоку на ділянці 13 – 8 продовжує збільшуватись, наближаючи стан транспортного потоку на цій ділянці до затору. Це призводить до перебудови оптимального маршруту, з якого вилучаються всі три модельні ділянки 14-19, 13-8 та 17-11 (дивись таблицю 3). При цьому оптимальний маршрут має таку конфігурацію – 8 - 2 - 4 - 10 - 7 - 5 - 12 - 13 - 15 - 14 - 18 - 19 - 20 - 16 - 17 - 9 - 11 - 1 - 3 - 6 – 8; час проходження оптимального маршруту – 88.1хв, довжина оптимального маршруту – 73.25 км. Аналогічна ситуація має місце в інші проміжки часу спостереження за динамікою транспортного потоку на ВДМ міста Києва (Табл.1).

Висновки. Отже, проведений аналіз результатів імітаційних досліджень, дає підстави вважати, що запропонований синергетичний підхід дозволяє достатньо адекватно здійснювати оптимізацію маршрутів доставки вантажу в режимі реального часу в умовах нестаціонарної динаміки транспортних потоків на ВДМ великих міст. У майбутньому він може знайти своє застосування в інтелектуальних транспортних системах (ІТС), наприклад, при вирішенні задач динамічної маршрутизації транспортних засобів з прогнозуванням трафіку [21]. В [21] основна ідея алгоритму полягає у

використанні в режимі реального часу інформації про трафік, а також прогнозованої інформації про дорожній рух, яку надає центральний контролер маршрутизації. У нашому випадку у реальному часі необхідно використовувати інформацію про щільність транспортного потоку на ділянках ВДМ. Ця інформація може бути отримана при використанні бортового обладнання зв'язку транспортного засобу з іншими транспортними засобами та інфраструктурою транспортних систем (V2V, V2I або I2V). Далі, на підставі отриманої в певні моменти часу реальної інформації про трафік в рамках синергетичної підходу щодо опису динаміки транспортного потоку, який розроблено в цій роботі, проводяться імітаційні моделювання альтернативних маршрутів, з яких визначаються найбільш оптимальні. Відповідно, отримана інформація про оптимальні маршрути в залежності від вихідних умов трафіку в певні моменти часу надається користувачу центральним контролером маршрутизації.

Подальша стратегія дослідження повинна бути спрямована на удосконалення цього методу, який дозволяв би враховувати вплив миттєвих значень фактичних параметрів динаміки транспортних потоків на ділянках ВДМ, світлофорного регулювання, тощо, на процеси оптимізації маршрутів доставки товарів. Отримані таким чином результати можуть бути використані для удосконалення існуючих інтелектуальних транспортних систем і технологій управління дорожнім рухом на ВДМ великих міст.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Lukinskiy, V. and Dobromirov, V.: Methods of evaluating transportation and logistics operations in supply chains. *Transport and Telecommunication*, 17, 55-59 (2016).
2. Knight, H.: New algorithm can dramatically streamline solution to the 'maxflow' problem, *MIT News*, 21-26 (2014).
3. Balasescu, S. and Balasescu, M.: Optimization methods for supply chain activities. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov Series V: Economic Sciences*, 7(56), 9-16 (2014).
4. Qingyou, Y. and Zhang, Q.: The Optimization of Transportation Costs in Logistics Enterprises with Time-Window Constraints. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2015, 10-15 (2015).
5. Prokudin G., Chupaylenko O., Dudnik O., Oliskevych M.: Development of Vehicle Speed Forecasting Method for Intelligent Highway Transport System. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. N. 4/3 (100). P. 6-14 (2019). doi:10.15587/1729-4061.2019.174255
6. Glover, F., Kochenberger, G.: *Handbook of Metaheuristics*. In: *International Series in Operations Research & Management Science* 57, 570 (2003).
7. McCall, J.: Genetic algorithms for modelling and optimization. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 184, 205-222 (2005).
8. Rejer, I., Lorenz, K.: Classic genetic algorithm vs. Genetic algorithm with aggressive mutation for feature selection for a brain-computer interface. *Przegląd Elektrotechniczny* 91(2), 98-102 (2015). doi:10.15199/48.2015.02.24.
9. Dorigo, M., Gambardella, L.M.: Ant colonies for the travelling salesman problem. *BioSystems* 43 (2), 73-81 (1997) doi: 10.1016/S0303-2647(97)01708-5.
10. Chandekar, N. and Jayachandran Pillai, M.: A Comparative Study of GA and ACO for Solving Travelling Salesman Problem. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 5(11), 34-37 (2017).
11. Ali, H., Haris, M., Hadi, F., Ahmadullah, Salman and Shah, Y.: Solving Traveling Salesman Problem through Optimization Techniques Using Genetic Algorithm and Ant Colony Optimization. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 6(4S), 55-62 (2016).
12. Danchuk V., Bakulich, O., Svatko V.: Building optimal routes for cargo delivery in megacities. *Transport and Telecommunication*, 20(2), 142 – 152 (2019). <https://doi.org/10.2478/tjt-2019-0013>
13. Seyedali Mirjalili: Ant Colony Optimisation. *Evolutionary Algorithms and Neural Networks*, 33-42 (2018) doi:10.1007/978-3-319-93025-1_3.
14. Haslina Abdullah, Rizaiddin Ramli, Dzuraidah Abd Wahab: Tool path length optimisation of contour parallel milling based on modified ant colony optimisation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 92, 1263-1276. (2017) doi:10.1007/s00170-017-0193-5.
15. Chiranjit Changdar, Dr. G.S. Mahapatra, Rajat Kumar Pal.: A modified ant colony optimisation based approach to solve sub-tour constant travelling salesman problem. *International Journal of Mathematics in Operational Research*, Vol. 11, No. 3 (2017). doi: 10.1504/IJMOR.2017.087204
16. Kerner B.S.: *Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control*. Berlin: Springer (2009).
17. Haken, H.: *Synergetics. Introduction and Advanced Topics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 758p (2004).

18. Puchkovska G.O., Makarenko S.P., Danchuk V.D., Kravchuk A.P., Baran J., Kotelnikova E.N., Filatov S.K.: Dynamics of molecules and phase transitions in the crystals of pure and binary mixtures of n-paraffins. *J. of Mol. Struct.* 614(1), 159-166 (2002) [https://doi.org/10.1016/S0022-2860\(02\)00237-5](https://doi.org/10.1016/S0022-2860(02)00237-5)
19. Olemskoi A., Khomenko A.: Synergetic theory for jamming transition in traffic flow. *Physical Review E* 63(3) (2001) doi: 10.1103/PhysRevE.63.036116
20. Danchuk V., Svatko V., Kunytska O., Kush Y.: Simulation of Processes for Optimizing the Delivery Routes of Goods on Urban Road Networks by a Synergetic Approach. *Lecture Notes in Networks and Systems* Volume 208, 175 – 196 (2021).
21. Kwangsoo Kim, Minseok Kwon, Jaegun Park, and Yongsoon Eun.: Dynamic Vehicular Route Guidance Using Traffic Prediction Information. Hindawi Publishing Corporation. – *Mobile Information Systems*. Volume 2016, 1–11 (2016). <http://dx.doi.org/10.1155/2016/3727865>

REFERENCES

1. Lukinskiy, V. and Dobromirov, V.: Methods of evaluating transportation and logistics operations in supply chains. *Transport and Telecommunication*, 17, 55-59 (2016).
2. Knight, H.: New algorithm can dramatically streamline solution to the ‘maxflow’ problem, *MIT News*, 21–26 (2014).
3. Balasescu, S. and Balasescu, M.: Optimization methods for supply chain activities. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov Series V: Economic Sciences*, 7(56), 9-16 (2014).
4. Qingyou, Y. and Zhang, Q.: The Optimization of Transportation Costs in Logistics Enterprises with Time-Window Constraints. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2015, 10-15 (2015).
5. Prokudin G., Chupaylenko O., Dudnik O., Olishevych M.: Development of Vehicle Speed Forecasting Method for Intelligent Highway Transport System. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. N. 4/3 (100). P. 6-14 (2019). doi:10.15587/1729-4061.2019.174255
6. Glover, F., Kochenberger, G.: *Handbook of Metaheuristics*. In: *International Series in Operations Research & Management Science* 57, 570 (2003).
7. McCall, J.: Genetic algorithms for modelling and optimization. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 184, 205-222 (2005).
8. Rejer, I., Lorenz, K.: Classic genetic algorithm vs. Genetic algorithm with aggressive mutation for feature selection for a brain-computer interface. *Przegląd Elektrotechniczny* 91(2), 98-102 (2015). doi:10.15199/48.2015.02.24.
9. Dorigo, M., Gambardella, L.M.: Ant colonies for the travelling salesman problem. *BioSystems* 43 (2), 73–81 (1997) doi: 10.1016/S0303-2647(97)01708-5.
10. Chandekar, N. and Jayachandran Pillai, M.: A Comparative Study of GA and ACO for Solving Travelling Salesman Problem. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 5(11), 34-37 (2017).
11. Ali, H., Haris, M., Hadi, F., Ahmadullah, Salman and Shah, Y.: Solving Traveling Salesman Problem through Optimization Techniques Using Genetic Algorithm and Ant Colony Optimization. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 6(4S), 55-62 (2016).
12. Danchuk V., Bakulich, O., Svatko V.: Building optimal routes for cargo delivery in megacities. *Transport and Telecommunication*, 20(2), 142 – 152 (2019). <https://doi.org/10.2478/tjt-2019-0013>
13. Seyedali Mirjalili: Ant Colony Optimisation. *Evolutionary Algorithms and Neural Networks*, 33-42 (2018) doi:10.1007/978-3-319-93025-1_3.
14. Haslina Abdullah, Rizaiddin Ramli, Dzuraidah Abd Wahab: Tool path length optimisation of contour parallel milling based on modified ant colony optimisation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 92, 1263–1276. (2017) doi:10.1007/s00170-017-0193-5.
15. Chiranjit Changdar, Dr. G.S. Mahapatra, Rajat Kumar Pal.: A modified ant colony optimisation based approach to solve sub-tour constant travelling salesman problem. *International Journal of Mathematics in Operational Research*, Vol. 11, No. 3 (2017). doi: 10.1504/IJMOR.2017.087204
16. Kerner B.S.: *Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control*. Berlin: Springer (2009).
17. Haken, H.: *Synergetics. Introduction and Advanced Topics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 758p (2004).
18. Puchkovska G.O., Makarenko S.P., Danchuk V.D., Kravchuk A.P., Baran J., Kotelnikova E.N., Filatov S.K.: Dynamics of molecules and phase transitions in the crystals of pure and binary mixtures of n-paraffins. *J. of Mol. Struct.* 614(1), 159-166 (2002) [https://doi.org/10.1016/S0022-2860\(02\)00237-5](https://doi.org/10.1016/S0022-2860(02)00237-5)
19. Olemskoi A., Khomenko A.: Synergetic theory for jamming transition in traffic flow. *Physical Review E* 63(3) (2001) doi: 10.1103/PhysRevE.63.036116

20.Danchuk V., Svatko V., Kunytska O., Kush Y.: Simulation of Processes for Optimizing the Delivery Routes of Goods on Urban Road Networks by a Synergetic Approach. Lecture Notes in Networks and Systems Volume 208, 175 – 196 (2021).

21.Kwangsoo Kim, Minseok Kwon, Jaegeun Park, and Yongsoon Eun.: Dynamic Vehicular Route Guidance Using Traffic Prediction Information. Hindawi Publishing Corporation. – Mobile Information Systems. Volume 2016, 1–11 (2016). <http://dx.doi.org/10.1155/2016/3727865>

РЕФЕРАТ

Данчук В.Д. Динамічна маршрутизація процесів доставки вантажів у містах на базі синергетичного підходу / В.Д. Данчук, В.В. Сватко, Н.В. Рудоман // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий журнал. – К. : НТУ, 2022. – Вип. 1 (51).

В роботі запропоновано синергетичний підхід до моделювання процесів оптимізації маршрутів доставки вантажів з урахуванням нестационарної динаміки транспортних потоків на ділянках міської дорожньої мережі. В рамках цього підходу аналітичні залежності зміни швидкості потоку руху від характерного часу зміни режиму динаміки транспортного потоку та щільності навантаження на ділянках мережі визначаються з використанням синергетичної моделі Лоренца. Далі, на підставі отриманої залежності швидкості транспортного потоку від його щільності за допомогою використання модифікованого алгоритму самоорганізації мурашиної колонії здійснюється оптимізація маршруту на мережі, що представляється у вигляді двонаправлено орієнтованого зваженого графа. Основним елементом модифікації є те, що тут реалізована можливість асинхронного руху агентів мурашиної колонії з певною швидкістю. Крім цього, також можливе фіксування результатів оптимізації частково пройденого шляху для розрахунку подальшого маршруту при зміні умов руху цих агентів. Це дозволяє здійснювати управління процесом оптимізації маршруту з урахуванням динамічного стану ВДМ, що пов'язаний із суттєвими змінами швидкості руху транспортних засобів на певних ділянках цієї мережі. Ці зміни швидкості можуть бути обумовлені підвищенням завантаженості ділянок ВДМ, виникненням заторів, аварійних ситуацій тощо.

Для апробації запропонованого методу здійснені імітаційні моделювання процесів оптимізації маршруту в рамках задачі комівояжера з урахуванням реальної динаміки транспортних потоків на прикладі ВДМ м. Києва. Тут при проведенні досліджень на певних модельних ділянках ВДМ експериментально визначались середні щільності транспортних потоків в певні моменти часу протягом доби. За результатами моделювання було виявлено низку ефектів. Ці ефекти пов'язані з перебудовою оптимальних маршрутів при зменшенні середніх швидкостей руху транспортних засобів на модельних ділянках ВДМ до певних граничних значень, які відповідають певним режимам руху транспортних потоків.

В роботі обговорюється можливість застосування запропонованого методу в інтелектуальних транспортних системах. Зокрема, цей метод може бути використаний при вирішенні проблем динамічної маршрутизації транспортних засобів з використанням інформації про прогнозування трафіку.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТРАНСПОРТНИЙ ПОТІК, ВУЛИЧНО-ДОРОЖНЯ МЕРЕЖА, СИНЕРГЕТИЧНИЙ ПІДХІД, СИНЕРГЕТИЧНА МОДЕЛЬ ЛОРЕНЦА, МУРАШИНИЙ АЛГОРИТМ.

ABSTRACT

Danchuk V.D., Svatko V.V., Rudoman N.V. Dynamic routing of cargo delivery processes in cities base on synergetic approach. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific journal. – Kyiv: National Transport University, 2022. – Issue 1 (51).

The paper proposes synergetic approach for simulation the processes of optimization of routes for the delivery of goods taking into account the non-stationary dynamics of traffic flows on sections of the urban road network. Within the framework of synergetic Lorentz model, the analytical dependences of the change in the speed of the traffic flow on the characteristic time of the change in the dynamics of the traffic flow and the density of the traffic flow in the network sections are determined. Further, based on the obtained dependence of the traffic flow speed on its density by using a modified self-organization algorithm of the ant colony, the route on the network is optimized. Here the urban road network is represented as a bidirectional weighted graph. The main element of the modification is that it implements the possibility of asynchronous movement of the each ant colony agent at a certain speed. In addition, it is also possible to fix the results of optimization of a partially traveled path for calculating a further route when the edge weight (length) of the graph changes during the movement. This allows you to management the route optimization process, taking into account the dynamic state of the network, which depends on the speed of movement of vehicles on certain sections of the

network. These changes in speed can be caused by an increase in the congestion of network sections, the occurrence of traffic jams, emergency situations, etc.

To test the proposed method, simulation of route optimization processes was carried out within the framework of the traveling salesman problem, taking into account the real dynamics of traffic flows on the example of the road network of Kyiv city. Here, when conducting research on some selected sections of the network, the average density of traffic flows at certain points in time during the day was experimentally determined. Based on the simulation results, a number of effects were identified. These effects are associated with the rebuilding of optimal routes when the average speeds of vehicles on the model sections of the network decrease to certain boundary values corresponding to certain modes of traffic flow.

The paper discusses the possibility of using the proposed method in intelligent transportation systems. In particular, this method can be used to solve dynamic vehicle routing problems using information about traffic prediction.

KEYWORDS: TRAFFIC FLOW, URBAN ROAD NETWORK, SYNERGETIC LORENTZ MODEL, SYNERGETIC APPROACH, ANT ALGORITHM.

АВТОРИ:

Данчук Віктор Дмитрович, доктор фізико-математичних наук, професор, Національний транспортний університет, декан факультету транспортних та інформаційних технологій, e-mail: vdanchuk@ukr.net, тел. +380996376677, Україна, 01010, м.Київ, вул. М. Бойчука 42, к. 211, orcid.org/0000-0003-3936-4509.

Сватко Віталій Володимирович, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, доцент кафедри інформаційних систем і технологій, e-mail: vsvatko83@gmail.com, тел. +380672351170, Україна, 01010, м.Київ, вул. Омеляновича-Павленка 1, к. 347а, orcid.org/0000-0002-0712-5688.

Рудоман Надія Володимирівна, Національний транспортний університет, старший викладач кафедри інформаційних систем і технологій, e-mail: nadiiarudoman@ukr.net, тел. +380979194705, Україна, 01010, м.Київ, вул. Омеляновича-Павленка 1, к. 347а, orcid.org/0000-0002-7923-8649.

AUTHOR:

Danchuk V.D., Dr. Sc. (Phys.-Math.), National Transport University, Dean of the Faculty of Transport and Information Technology, e-mail: vdanchuk@ukr.net, tel. +380996376677 Ukraine, 01010, Kyiv, Boychuk str. 42, of. 211, orcid.org/0000-0003-3936-4509.

Svatko V.V., Ph.D., National Transport University, associate professor department of information systems and technology, e-mail: vsvatko83@gmail.com, tel. +380672351170 Ukraine, 01010, Kyiv, Omelyanovicha-Pavlenka str. 1, of. 347a, orcid.org/0000-0002-0712-5688.

Rudoman N.V., National Transport University, senior teacher, e-mail: nadiiarudoman@ukr.net, tel. +380979194705, Ukraine, 01010, Kyiv, Omelyanovicha-Pavlenka str. 1, of. 347a, orcid.org/0000-0002-7923-8649.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Москаленко А.О., кандидат технічних наук, доцент, Міжнародний науково-технічний університет ім. Ю.Бугая, завідувач кафедри комп'ютерних наук та інженерії програмного забезпечення, Київ, Україна.

Прокудін Г.С., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри міжнародних перевезень та митного контролю, Київ, Україна.

REVIEWER:

Moskalenko A.O., PhD (Eng.), Associate professor, International University of Science and Technology, Head of the Department of Computer Science and Software Engineering, Kyiv, Ukraine.

Prokudin H.S., Doctor of Technical Science, Professor, National Transport University, Head Department of International Transportation and Customs Control, Kyiv, Ukraine.