

ІНСТИТУТ КІБЕРНЕТИКИ
імені В.М. Глушкова НАН УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ ТА ІНФОРМАТИКИ
імені Володимира Андрунакієвича МОЛДОВИ
ІНСТИТУТ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ
НАН АЗЕРБАЙДЖАНУ

Матеріали
7-ї міжнародної наукової конференції
МОДЕЛЮВАННЯ І ОПТИМІЗАЦІЯ
У ТРАНСПОРТІ ТА ЛОГІСТИЦІ

присвяченої
85-річчю з дня народження
академіка НАН України Наума Зуселевича Шора
21 – 25 березня 2022 року



Kyiv–Chisinau–Baku–2022

ОПТИМІЗАЦІЯ ДОСТАВКИ ПОСИЛОК У КОНТЕКСТІ ЛОГІСТИКИ ОСТАННЬОЇ МІЛІ

ГРИГОРАК М.Ю.

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова
НАН України, м. Київ, Україна
marygrigorak@gmail.com

КІСІЛЕВИЧ О.В.

Львівський торговельно-економічний
університет, Львів, Україна
l_kisilevych@ukr.net

Розглядається процес доставки посилок і дрібних відправлень товарів, проданих через інтернет-магазини, від сортувального центру поштової служби до автоматизованих поштових станцій (поштоматів). Представлена економіко-математична модель для оптимізації схем доставки з урахуванням гнучкого вибору адресатами місця розташування поштоматів та можливостей використання різних видів міського вантажного транспорту.

Ключові слова: міська логістика, логістика останньої милі, моделювання доставки посилок, економіко-математичні методи.

l_kisilevych@ukr.net

Активний розвиток електронної комерції протягом останніх років актуалізував попит на прискорену доставку товарів до кінцевих споживачів у межах міських територій. Зростання обсягів товарних потоків супроводжується загостренням проблем, пов'язаних із транспортуванням, зокрема, збільшення викидів парникових газів, утворення заторів, настання дорожньо-транспортних пригод, пошкодження інфраструктури тощо. Особливо тенденція до зростання міського вантажного потоку сильно впливає на логістику останньої милі (LML), яка є важливою, але неефективною та дуже дорогою частиною ланцюга постачання [1].

Термін «остання миля» знайшов широке використання у науковій літературі і найчастіше трактується як «останній етап у сегменті

доставки B2C (від бізнесу до споживача), за допомогою якого вантаж доставляється одержувачу або в будинок одержувача, або в пункт прийому» [2]. Розгляд процесів LML, як правило, здійснюється в контексті міської логістики, метою якої є зменшення шкідливого впливу громадського та вантажного транспорту на довкілля, а також оптимізація використання міського простору і підвищення якості життя міського населення [1-3].

Зазначимо, що особливість логістичні процеси останньої милі характеризуються короткими маршрутами перевезення, низькою швидкістю водіння, коротким часом ефективного водіння, тривалими простоями транспортних засобів, трудомісткістю, обмеженням простору, обмеженою інфраструктурою руху в порівнянні з високою попит на транспорт, низькою ефективністю (низьким коефіцієнтом завантаження, великою питомою вагою порожніх пробігів тощо).

Автори досліджень [2, 4] зробили висновок про те, що зростання обсягів електронної комерції заставляє бізнес не тільки шукати шляхи економії витрат на доставку, але й відкриває нові можливості для інновацій та інвестицій. Зокрема, зростає попит на використання smart lockers (розумних комірків), які розміщуються в місцях високої концентрації людей для тимчасового зберігання дрібних поштових відправлень, та більш екологічних видів транспорту для міських перевезень, зокрема, вантажних електровелосипедів, електроскутерів, невеличких вантажних електромобілів, безпілотних автомобілів і літальних апаратів, дронів тощо [5].

Основою для нашого дослідження стала публікація [6], в якій було сформульовано проблему оптимізації гнучкої доставки посилок конкретним транспортним засобом. На відміну від запропонованого автора цієї статті підходу ми розглянули цю проблему для різних видів транспорту.

Розглянемо більш детально процес доставки невеличких посилок і бандеролей від регіонального депо (сортувального центру поштової служби (СЦПС), розподільчого центру) до місця дислокації автоматизованих поштових станцій (АПС, поштоматів). Особливістю такої доставки є те, що одержувач товару – кінцевий споживач –

отримує товар в комірці автоматизованої поштової станції, розташованої поблизу його місця проживання, місця роботи чи на маршруті з роботи до дому, у зручний для себе час. За бажанням одержувач може вказати більше одного можливих місць доставки товару, що дозволяє кур'єрській/поштової компанії більш гнучко використовувати власні ресурси, консолідувати поставки та виконати логістичні операції за меншу вартість і коротший час. Загальна схема доставки посилок представлена на рис. 1.

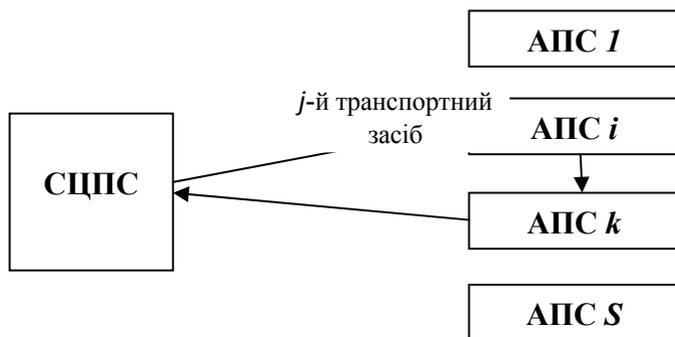


Рис. 1. Схема маршруту доставки посилок з сортувального центру поштової/кур'єрської служби до місця розташування автоматизованих поштових станцій (поштоматів)

Вирішення задачі оптимізації процесів доставки посилок в контексті логістики останньої милі потребує розробки окремої економіко-математичної моделі, яка би враховувала альтернативні можливості використання різних транспортних засобів з урахуванням впливу на довкілля, а також дозволяла будувати оптимальні маршрути для кожного транспортного засобу і гнучкої доставки посилок до місць дислокації АПС (поштоматів) з урахуванням наборів можливих пунктів призначення, що визначаються адресатом.

Зауважимо, що автоматизована поштова станція (поштомат) представляє автоматизований термінал із видачі товарів, замовлених в інтернет-магазинах, з терміналом для оплати. Поштомат обладнаний вбудованими комірками-скриньками різного розміру для зберігання

замовлень і центральною консоллю із сенсорним екраном для керування процесом отримання замовлень, слотом для оплати пластиковою картою та купюроприймальником. Завантаження в поштову станцію та отримання відправлень відбувається за допомогою спеціальних кодів доступу, які вводяться на сенсорному екрані.

АПС зазвичай устанавлюються в місцях зосередження максимального потоку людей, що дозволяє створити додатковий комфорт користувачам завдяки можливості вибору найближчого до будинку терміналу. Якщо такий термінал розташовано у приміщенні з цілодобовим доступом або на вулиці, основна ідея та цінність сервісу поштоматів полягає в отриманні замовлення в будь-який зручний для клієнта час (вдень або вночі). Тобто покупець сам вирішує, де й коли забрати свій товар. Йому не треба підлаштовуватися під графік кур'єра або режим роботи пунктів видачі.

Для формулювання економіко-математичної моделі гнучкої доставки посилок введемо наступні позначення:

S – множина автоматизованих поштових станцій (АПС), до яких здійснюється доставка посилок від сортувального центру поштової служби, місце розміщення якого позначається точкою 0 ; $S_0 = S \cup \{0\}$, $i, k = 0, \dots, S$;

Q – множина посилок, які мають бути доставлені до адресатів на одну із АПС, $q = 1, \dots, Q$;

S_q – множина АПС, на які потенційно може бути доставлена посылка $q \in Q$,

J – множина транспортних засобів, які можуть бути використані до доставки посилок від СЦПС до АПС, $j = 1, \dots, J$;

R - множина типорозмірів посилок (як правило, до поштоматів приймаються документи та посылки до 20 кг фактичної ваги, їхній розмір має бути не більше 40x60x30 см), $r = 1, \dots, R$;

t_{ikj} – тривалість руху від i -ої АПС до k -ої, що здійснюється j -им транспортним засобом;

Y_j – тривалість розвантаження посилок на j -ому транспортному засобі;

T_j – максимальна тривалість маршруту j -ого транспортного засобу, що визначається обмеженнями щодо терміну доставки посилок;

b_{jr} – кількість посилок розміру r , що може бути завантажено в j -ий транспортний засіб;

d_{ir} – кількість доступних комірок розміру r на i -ій АПС;

G_q – мінімальний розмір комірки, в яку може поміститися посылка q ;

c_j – собівартість години часу транспортної роботи j -го транспортного засобу;

P_q – штраф за недоставку/несвоєчасну поставку посылки q ;

x_{ikj} – булева змінна, яка приймає значення 1, якщо j -ий транспортний засіб рухається від i -ої АПС до k -ої;

y_{qikj} – булева змінна, яка приймає значення 1, якщо j -ий транспортний засіб перевозить посылку q від i -ої АПС до k -ої;

z_{qij} – булева змінна, яка приймає значення 1, якщо посылку q доставлена до i -ої АПС j -им транспортним засібом;

τ_{ij} – булева змінна, яка приймає значення 1, якщо j -ий транспортний засіб прибув на i -у АПС.

З урахуванням введених позначень економіко-математична модель оптимізації доставки посилок від СЦПС до АПС може бути сформульована наступним чином: необхідно знайти мінімум цільової функції (1) при обмеженнях на область допустимих значень змінних (2)–(17).

$$\sum_{i \in S} \sum_{k \in S} \sum_{j \in J} c_j t_{ikj} x_{ikj} + \sum_{q \in Q} \left(1 - \sum_{i \in S} \sum_{j \in J} z_{qij} \right) P_q \rightarrow \min \quad (1)$$

- ділянка, якою перевозиться посылка між двома АПС конкретним транспортним засобом, має бути частиною маршруту цього транспортного засобу:

$$y_{qikj} \leq x_{ikj}, \quad q \in Q, \quad i, k \in S, \quad j \in J \quad (2)$$

- загальна кількість посилок певного розміру або більшого, що відправляється з СЦПС до конкретної АПС, має щонайбільше дорівнювати загальній місткості транспортного засобу для посилок такого розміру або більше. Ця нерівність гарантує, що кожен транспортний засіб має достатню місткість для посилок кожного розміру, які він має доставити, незалежно від розподілу посилок до певних АПС:

$$\sum_{q: G_q \leq r} y_{q0kj} \leq x_{0ij} \sum_{r^*=1}^r b_{r^*j}, \quad \forall r \in R, \quad i \in S, \quad j \in J \quad (3)$$

- загальна кількість посилок r -го розміру або більше, які доставляються до конкретної АПС, не повинна перевищувати кількість доступних комірок такого розміру. Ця нерівність гарантує, що кожна станція має достатню ємність для посилок кожного розміру, які мають бути доставлені адресатам:

$$\sum_{q: G_q \leq r} \sum_{i \in S_q} z_{qij} \leq \sum_{r^*=1}^r d_{ir^*}, \quad \forall i \in S, \quad r \in R \quad (4)$$

- принаймні один транспортний засіб може виїхати з будь-якої АПС, оскільки ми припускаємо, що роздільні поставки не допускаються:

$$\sum_{k \in S_0} x_{ikj} \leq 1, \quad \forall i \in S, \quad j \in J \quad (5)$$

- кількість транспортних засобів, які прибувають до місця, дорівнює кількості транспортних засобів, які виїжджають з нього (рівняння збереження руху транспортних засобів). Зауважимо, що відповідно до (5) на кожній АПС це число дорівнює або нулю, або одиниці:

$$\sum_{k \in S_0} x_{ikj} = \sum_{k \in S_0} x_{kij}, \quad \forall i \in S_0, \quad \forall j \in J \quad (6)$$

- кожна посилка, яка прямує до АПС, повинна залишити цю станцію:

$$\sum_{i \in S_0} y_{qikj} = \sum_{i \in S_0} y_{qkij}, \forall q \in Q, k \in S \setminus S_q, \forall j \in J \quad (7)$$

- кожна посилка, яка прямує до однієї з АПС, або залишається на цій станції або переміщується до іншої. Разом (7) і (8) обумовлюють збереження потоку ділянок маршруту:

$$\sum_{i \in S_0} y_{qikj} = \sum_{i \in S_0} y_{qkij} + z_{qkj}, \forall q \in Q, k \in S_q, j \in J \quad (8)$$

- якщо транспортний засіб їде від i -ої АПС до k -ої, то його час прибуття до станції k розраховується як час прибуття до i -ої станції плюс час, необхідний для розвантаження всіх доставлених посилок, плюс час у дорозі:

$$\tau_{kj} \geq \tau_i + \gamma_j \sum_{q: i \in S_0} z_{qij} + t_{ikj} - (1 - x_{ikj})T, \forall i \in S_0, k \in S, j \in J \quad (9)$$

- час прибуття в депо дорівнює нулю:

$$\tau_0 = 0 \quad (10)$$

- загальна тривалість кожного рейсу транспортного засобу обмежена:

$$\tau_{kj} + \gamma_j \sum_{q: i \in S_q} z_{qkj} + t_{k0j} \leq T_j, \forall k \in S, j \in J \quad (11)$$

- кожна посилка може бути доставлена тільки одній АПС:

$$\sum_{i \in S_q} z_{qij} \leq 1, \forall q \in Q, j \in J \quad (12)$$

- із СЦПС на АПС можуть бути доставлені посилки тільки одним транспортним засобом:

$$\sum_{k \in S} y_{q0kj} \leq \sum_{i \in S_q} z_{qij}, \forall q \in Q, j \in J \quad (13)$$

- області допустимих значень змінних:

$$x_{ikj} \in \{0, 1\}, i, k \in S_0, j \in J \quad (14)$$

$$y_{qikj} \in \{0, 1\}, \forall q \in Q, i, k \in S_0, j \in J \quad (15)$$

$$z_{qij} \in \{0,1\}, q \in Q, i, \in S_q, j \in J \quad (16)$$

$$\tau_{ij} \in \{0,1\}, i \in S, j \in J \quad (17)$$

Описана формулами (1)-(17) задача представляє собою задачу булевого лінійного програмування і для її розв'язку можуть бути використані різні методи. Автори статті [6] пропонують використовувати евристичні алгоритми, які розроблені для генерування хороших рішень, зокрема, евристику заощаджень Кларка-Райта і евристику пелюсток Фостера і Райана (1976) і Райана та ін. На нашу думку, для опису математичної моделі (1)-(17) можна використати мову моделювання AMPL [7], а пошук оптимальних рішень задачі доставки посилок до автоматизованих поштових станцій з урахуванням гнучкості вибору їх місця розташування можна знайти за допомогою сучасних солверів для розв'язання булевих задач, які є на NEOS-сервері [8].

Література

1. Bosona T. Urban Freight Last Mile Logistics - Challenges and Opportunities: A Literature Review. *Sustainability*. 2020. 12(21). 8769; <https://doi.org/0.3390/su12218769>.
2. Alves de Araújo F., Mendes dos Reis J.G., Terra da Silva M., Aktas E. A Fuzzy Analytic Hierarchy Process Model to Evaluate Logistics Service Expectations and Delivery Methods in Last-Mile Delivery in Brazil. *Sustainability*. 2022. 14. 5753. <https://doi.org/10.3390/su14105753>.
3. Johan Hagberg, Kajsa Hulthén. Consolidation through resourcing in last-mile logistics. *Research in Transportation Business & Management*. 2022. [Online] Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210539522000554>.
4. Urquhart R., Newing A., Hood N., Heppenstall A. Last-Mile Capacity Constraints in Online Grocery Fulfilment in Great Britain. *J. Theor. Appl. Electron. Commer.* 2022. №17. P.636–651. <https://doi.org/10.3390/jtaer17020033>.
5. Rahmani Mokarrari K., Shirazian S., Aghsami A., Jolai, F. A stochastic-fuzzy multi-objective model for the last-mile delivery problem

using drones and ground vehicles, a case study. 2022. *Scientia Iranica*.
[https://doi: 10.24200/sci.2022.57891.5460](https://doi.org/10.24200/sci.2022.57891.5460)

6. Ido Orenstein, Tal Raviv, Elad Sadan. Flexible parcel delivery to automated parcel lockers: models, solution methods and analysis. *Journal on Transportation and Logistics*. 2019. Vol. 8. Issue 5. P.683-711.

7. Fourer R., Gay D., Kernighan B. AMPL, A Modeling Language for Mathematical Programming. Belmont: Duxbury Press, 2003. 517 p.

8. Стецюк П.І., Соломон Д.І., Григорак М.Ю. Про найкоротші k -вершинні цикли та шляхи. *Cybernetics and Computer Technologies*. 2021, No.3. С. 15-33.