ECONOMICS

DOI: https://doi.org/10.64076/ap261109.03

Serhii Cheverda
Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine
ORCID iD: 0000-0003-2161-037X
Nataliia Maksyshko
Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine
ORCID iD: 0000-0002-0473-7195
Oleksandr Cheverda
Shchedro LLC, Dnipro, Ukraine
ORCID iD: 0009-0002-0812-8423

OPTIMISATION OF PERISHABLE PRODUCT DELIVERY ROUTES UNDER WARTIME CONDITIONS AS A FACTOR OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF FOOD SUPPLY CHAINS

Abstract. The theses substantiate a vehicle routing model with time windows for delivering perishable products to retail chain stores in Kyiv under air-raid alerts, curfew and scheduled power outages as a tool for enhancing the sustainability of food supply chains. In the model, store outage periods are excluded from delivery time windows, trip duration is limited by temperature requirements for transportation, and expected delays due to alerts are captured by a time buffer coefficient. A case of mayonnaise delivery to 24 stores shows that routes planned without wartime constraints achieve on-time delivery of only 64.6 % of orders in real conditions, whereas optimised routes achieve 94.3 %. The volume of products with failed delivery decreases 6.2 times, while mileage and CO_2 emissions increase by only 2.3 %, which contributes to Sustainable Development Goal target 12.3 on reducing food losses along supply chains.
Keywords: sustainable development; Sustainable Development Goals; food supply chains; food losses; vehicle routing; perishable products; time windows; war.

Сергій Чеверда
Запорізький національний університет, Запоріжжя, Україна
ORCID iD: 0000-0003-2161-037X
Наталія Максишко
доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри
Запорізький національний університет, Запоріжжя, Україна
ORCID iD: 0000-0002-0473-7195
Олександр Чеверда
ТОВ "Щедро", м. Дніпро, Україна
ORCID iD: 0009-0002-0812-8423

ОПТИМІЗАЦІЯ МАРШРУТІВ ДОСТАВКИ ШВИДКОПСУВНОЇ ПРОДУКЦІЇ В УМОВАХ ВІЙНИ ЯК ЧИННИК СТАЛОГО РОЗВИТКУ ПРОДОВОЛЬЧИХ ЛАНЦЮГІВ ПОСТАЧАННЯ

Анотація. У роботі обґрунтовано модель маршрутизації транспорту з часовими вікнами для доставки швидкопсувної продукції до магазинів роздрібних мереж Києва в умовах повітряних тривог, комендантської години та графіків відключення електроенергії як інструмент підвищення сталості продовольчих ланцюгів постачання. У моделі періоди знеструмлення магазинів виключено з вікон приймання товару, тривалість рейсу обмежено вимогами до температури перевезення, а очікувані затримки через тривоги враховано коефіцієнтом запасу часу. На прикладі доставки майонезу до 24 магазинів показано, що у реальних умовах маршрути, побудовані без урахування воєнних обмежень, забезпечують своєчасну доставку лише 64,6 % замовлень, а оптимізовані – 94,3 %. Обсяг продукції, доставку якої зірвано, скорочується в 6,2 рази за зростання пробігу та викидів CO_2 лише на 2,3 %, що відповідає завданню 12.3 Цілей сталого розвитку щодо скорочення втрат продовольства в ланцюгах постачання.
Ключові слова: сталий розвиток; Цілі сталого розвитку; продовольчі ланцюги постачання; втрати продовольства; маршрутизація транспорту; швидкопсувна продукція; часові вікна; війна.

Сталий розвиток продовольчих ланцюгів постачання є одним із пріоритетів Порядку денного у сфері сталого розвитку на період до 2030 року [1]. Завдання 12.3 Цілей сталого розвитку передбачає скорочення втрат продовольства в ланцюгах виробництва та постачання, проте, за оцінкою ФАО, у 2023 році у світі втрачено 13,3 % продовольства на етапах від збирання врожаю до роздрібної торгівлі, причому порівняно з 2015 роком помітного прогресу не досягнуто [2]. В Україні цілі сталого розвитку закріплено Указом Президента № 722/2019 [3], проте в умовах війни їх досягнення ускладнюється пошкодженням енергетичної та транспортної інфраструктури, що безпосередньо позначається на логістиці харчових продуктів.

Повномасштабна війна суттєво ускладнила доставку харчових продуктів до роздрібних мереж. Лише в Києві у 2025 році було оголошено 511 повітряних тривог загальною тривалістю 740,2 годин, а з 1 січня до 14 вересня 2026 року – 518 тривог тривалістю 481 годин, тобто в середньому близько двох тривог на добу [4]. Комендантська година в місті з 10 вересня 2026 року діє з 01:00 до 05:00 [5], а внаслідок масованих ударів по енергосистемі восени 2026 року відключення електроенергії в окремих регіонах сягають 10 годин на добу [6]. Під час знеструмлення магазини обмежено приймають товар, оскільки не працюють холодильне обладнання, підйомники та облікові системи.

Об'єктом дослідження обрано доставку майонезу. Ринок соусів в Україні продовжує зростати: у 2024 році – на 8 %, у 2025 році очікувалося зростання на 3 – 4 %, а експорт соусів майже вдвічі перевищує імпорт [7]. Водночас майонез належить до швидкопсувних вантажів і перевозиться за правилами перевезення швидкопсувних вантажів за температури від 0 до +18 С [8]. Тривалі простої транспорту під час тривог або очікування подачі електроенергії створюють ризик

порушення температурного режиму, особливо влітку та взимку і, як наслідок, ризик втрат продовольства, на скорочення яких спрямоване завдання 12.3.

Класичну задачу маршрутизації транспорту сформулювали Дж. Данциг і Дж. Рамсер [9], евристичний метод заощаджень для неї запропонували Г. Кларк і Дж. Райт [10], а постановку з часовими вікнами та тестові задачі розробив М. Соломон [11]. Для швидкопсувної продукції Ч.-І. Сюй, Ш.-Ф. Хун і Х.-Ч. Лі доповнили модель витратами, пов'язаними з втратою якості продукції в дорозі [12]. Екологічний вимір сталого розвитку відображено в задачі маршрутизації з мінімізацією забруднення Т. Бекташа і Г. Лапорта [13], а для розв'язання задач маршрутизації великої розмірності І. В. Козін зі співавторами запропонували еволюційно-фрагментарну модель [14]. Проте ці моделі не враховують чинників, характерних для воєнного часу: переривання робочого дня тривогами та знеструмлення одержувачів за графіками.

Мета дослідження – обґрунтувати модель маршрутизації доставки швидкопсувної продукції до роздрібних мереж з урахуванням воєнних обмежень та оцінити її ефективність в економічному, соціальному та екологічному вимірах сталого розвитку порівняно з традиційним плануванням.

Нехай N – множина магазинів, $V = N \cup \{0\}$ – множина вузлів разом зі складом, K – множина транспортних засобів. Змінна $x_{ijk} = 1$, якщо автомобіль k рухається з вузла i до вузла j, в іншому випадку $x_{ijk} = 0$. Цільова функція відображає витрати на пробіг і використання автомобілів:

$$Z = c \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} d_{ij} x_{ijk} + F \sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{0jk} \to \min \tag{1}$$

де c – змінні витрати на 1 км пробігу; d_{ij} – відстань, км; F – денні постійні витрати на автомобіль.

Обмеження вантажопідйомності, послідовності обслуговування та часових вікон мають вигляд:

$$\sum_{i \in N} q_i \sum_{j \in V} x_{ijk} \le Q, \qquad k \in K \tag{2}$$

$$s_j \ge s_i + \big(\tau_i + t_{ij}\big)(1 + \beta) - M\big(1 - x_{ijk}\big) \tag{3}$$

$$a_i \le s_i \le b_i - \tau_i, \qquad s_i \notin (o_i - \tau_i;\ \bar{o}_i) \tag{4}$$

$$S_k^{end} - S_k^{start} \le T_{\max}, \qquad \beta = \lambda\mu \tag{5}$$

де q_i – обсяг замовлення, кг; Q – вантажопідйомність автомобіля; s_i – час початку розвантаження; τ_i – тривалість розвантаження; t_{ij} – час руху; M – велике число; $[a_i;\ b_i]$ – вікно приймання товару; $(o_i;\ \bar{o}_i)$ – період відключення електроенергії за графіком черги, до якої належить магазин; $T_{\max}$ – максимальна тривалість рейсу за умовою збереження температурного режиму; β – коефіцієнт запасу часу на тривоги; λ – інтенсивність тривог; μ – середня тривалість тривоги, год.

Обмеження (4) є нестандартним: вікно приймання стає розривним, оскільки розвантаження не може відбуватися під час знеструмлення магазину.

Розрахунки виконано для умовного дистриб'ютора, склад якого розташований на західній околиці Києва і щодня обслуговує 24 магазини роздрібних мереж із загальним замовленням 7 240 кг (від 120 до 480 кг на магазин). Доставку здійснюють ізотермічні фургони вантажопідйомністю 1,5 т із середньою швидкістю 25 км/год. Змінні витрати становлять 17,55 грн/км за витрати пального 13 л/100 км і ціни дизельного пального 104,26 грн/л [15], постійні – 3 500 грн на автомобіль за день. Магазини приймають товар з 07:00 до 16:00 і належать до трьох черг відключень із чотиригодинними періодами знеструмлення. За даними про тривоги в Києві у 2026 році $\lambda = 0{,}084$ і $\mu = 0{,}93$ год [4], звідки $\beta \approx 0{,}08$; максимальну тривалість рейсу прийнято 6 год. Задачу розв'язано в бібліотеці Google OR-Tools [16] методом керованого локального пошуку, а виконання маршрутів перевірено імітаційним моделюванням 2 000 робочих днів із випадковими тривогами. Результати наведено в табл. 1 і на рис. 1.

Таблиця 1. Порівняння варіантів планування маршрутів доставки майонезу

Варіант	Кількість автомобілів	Пробіг, км	Плановані витрати, грн/день	Своєчасна доставка, %	Очікувані витрати, грн/день
Традиційний план, мирні умови	5	247,4	21 842	100,0	21 842
Традиційний план, воєнні умови	5	247,4	21 842	64,6	38 822
Оптимізований план (β = 0,08)	5	253,1	21 944	94,3	24 704
Оптимізований план із запасом (β = 0,20)	6	270,8	25 753	95,6	27 853

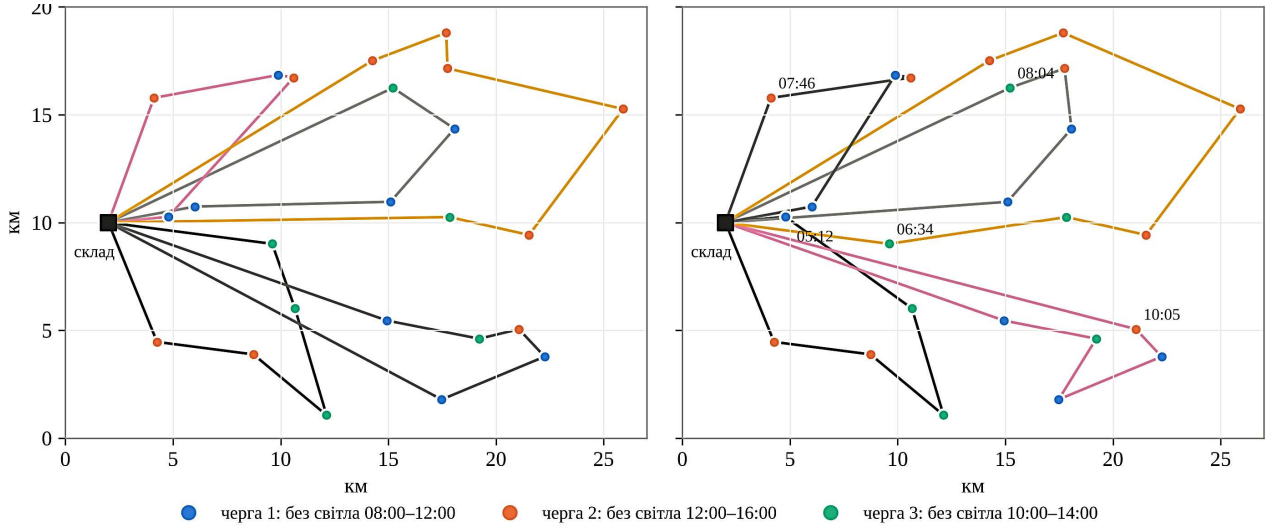
Примітка: очікувані витрати включають 2 000 грн на кожен зрив доставки або перевищення допустимої тривалості рейсу (повторна доставка та втрачені продажі).

Джерело: розраховано авторами.

Маршрути, сплановані традиційно, тобто з одночасним виїздом усіх автомобілів о 06:00 і без урахування відключень, у мирних умовах забезпечують повну своєчасність доставки. У воєнних умовах своєчасно доставляється лише 64,6 % замовлень: автомобілі прибувають до магазинів, у яких немає світла, і змушені чекати або переносити доставку. Через це перевищується допустима тривалість рейсу. Окремо самі тривоги знижують своєчасність лише до 98,5 %, тому основним чинником зривів є саме графіки знеструмлень.

Оптимізовані маршрути змінюють послідовність об'їзду магазинів і розносять виїзди автомобілів у часі – з 05:12, одразу після закінчення комендантської

години, до 10:05, відповідно до черг відключень. За тієї самої кількості автомобілів пробіг зростає лише на 2,3 %, а плановані витрати – на 0,5 %, проте своєчасність доставки підвищується до 94,3 %. Очікувані витрати з урахуванням зривів доставки знижуються з 38 822 до 24 704 грн на день, тобто на 36,4 %, що за 300 робочих днів становить близько 4,2 млн грн на рік. Збільшення запасу часу до β=0,20 потребує шостого автомобіля і підвищує своєчасність лише до 95,6 %. Це свідчить, що надмірне резервування часу економічно невиправдане, а основний ефект дає врахування графіків відключень.



а) б)

Рис. 1. Маршрути доставки майонезу до магазинів роздрібних мереж (позначено час виїзду автомобілів зі складу): а) без урахування воєнних обмежень; б) з урахуванням відключень і тривог

Джерело: розраховано авторами

Ефект оптимізації доцільно оцінювати за трьома вимірами сталого розвитку. В економічному вимірі він полягає у зниженні очікуваних витрат на 36,4 %. Соціальний вимір відображає обсяг продукції, доставку якої зірвано: він скорочується з 2 563 до 413 кг на день, тобто в 6,2 рази, або з 769 до 124 т на рік. Це зменшує ризик втрат швидкопсувної продукції через порушення температурного режиму та підвищує стабільність забезпечення населення продовольством в умовах воєнних загроз. В екологічному вимірі за коефіцієнта викидів 2,68 кг CO_2 на 1 л дизельного пального [17] плановий пробіг оптимізованих маршрутів зумовлює 88,2 кг CO_2 на день проти 86,2 кг за традиційного плану, тобто приріст становить лише 2,3 %. Цю оцінку отримано без урахування повторних рейсів, яких за традиційного плану у воєнних умовах потрібно значно більше, тому фактичний екологічний ефект оптимізації є ще сприятливішим. Натомість збільшення запасу часу до β = 0,20 підвищує викиди

до 94,3 кг CO_2 на день, тобто на 9,5 %, що підтверджує недоцільність надмірного резервування і з екологічного погляду.

У воєнних умовах планування доставки швидкопсувної продукції має ґрунтуватися на актуальних графіках відключень електроенергії одержувачів, а не лише на відстанях і стандартних вікнах приймання. Запропонована модель поєднує економічну ефективність доставки з цілями сталого розвитку: вона підвищує своєчасність доставки, зменшує ризик втрат продовольства через порушення температурного режиму та не потребує суттєвого збільшення пробігу й пов'язаних з ним викидів CO_2. Модель може бути використана дистриб'юторами харчових продуктів для підвищення стійкості ланцюгів постачання. Перспективи подальших досліджень полягають у включенні викидів парникових газів до цільової функції та оновленні графіків відключень у режимі реального часу.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development : Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015 (A/RES/70/1). United Nations, 2015. URL: https://undocs.org/A/RES/70/1

2. Global food losses (SDG Indicator 12.3.1a). FAO SDG Indicators Data Portal. URL: https://www.fao.org/sustainable-development-goals-data-portal/data/indicators/1231-global-food-losses

3. Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року : Указ Президента України від 30.09.2019 № 722/2019. URL: https://www.president.gov.ua/documents/7222019-29825

4. Ткаченко О. Повітряні тривоги: скільки годин тривали в Києві та області за час війни. Dengi.ua. 14.09.2026. URL: https://dengi.ua/ua/suspilstvo/9762506-povitryani-trivogi-skilki-godin-trivali-v-kijevi-ta-oblasti-za-chas-vijni

5. У Києві скоротять комендантську годину: з 10 вересня вона діятиме з 1:00 до 5:00. BorgExpert. 07.09.2026. URL: https://borgexpert.com/news/u-kyievi-skorotiat-komendantsku-hodynu-z-10-veresnia-vona-diiatyme-z-1-00-do-5-00

6. Барбу С. Уже без оптимістичного сценарію. Російські масовані атаки погіршили прогнози на зиму. LB.ua. 29.10.2026. URL: https://lb.ua/economics/2026/10/29/776764_bez_optimistichnogo_stsenariyu.html

7. Ринок соусів в Україні може зрости на 4 %. UkrAgroConsult. 24.11.2025. URL: https://ukragroconsult.com/news/rynok-sousiv-v-ukrayini-mozhe-zrosty-na-4

8. ДСТУ 4487:2005. Майонези. Загальні технічні умови. URL: https://dnaop.com/html/62185/doc-ДСТУ_4487_2005

9. Dantzig G. B., Ramser J. H. The truck dispatching problem. Management Science. 1959. Vol. 6, No. 1. P. 80–91. DOI: https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80.

10. Clarke G., Wright J. W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. Operations Research. 1964. Vol. 12, No. 4. P. 568–581. DOI: https://doi.org/10.1287/opre.12.4.568.

11. Solomon M. M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. Operations Research. 1987. Vol. 35, No. 2. P. 254–265. DOI: https://doi.org/10.1287/opre.35.2.254.

12. Hsu C.-I., Hung S.-F., Li H.-C. Vehicle routing problem with time-windows for perishable food delivery. Journal of Food Engineering. 2007. Vol. 80, No. 2. P. 465–475. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.05.029.

13. Bektaş T., Laporte G. The Pollution-Routing Problem. Transportation Research Part B: Methodological. 2011. Vol. 45, No. 8. P. 1232–1250. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.02.004.

14. Kozin I. V., Kryvtsun O. V., Pinchuk V. P. Evolutionary-fragmentary model of the routing problem. Cybernetics and Systems Analysis. 2015. Vol. 51, No. 3. P. 432–437. DOI: https://doi.org/10.1007/s10559-015-9734-9.

15. Ціни на дизельне паливо в Україні. Мінфін. URL: https://index.minfin.com.ua/ua/markets/fuel/dt

16. Perron L., Furnon V. OR-Tools. Version 9.15. Google. URL: https://developers.google.com/optimization

17. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol. 2: Energy. Chapter 3: Mobile Combustion. Hayama : IGES, 2006. URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html