УДК 656.073.7:519.246

В.В. Стельмащук, О.А. Коваль
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

ПРОГНОЗУВАННЯ ВАНТАЖОПОТОКУ ЯК ОСНОВА ПЛАНУВАННЯ ПРОВІЗНОЇ СПРОМОЖНОСТІ МІЖНАРОДНОГО АВТОМОБІЛЬНОГО ПЕРЕВІЗНИКА

Розглянуто задачу планування провізної спроможності міжнародного автомобільного перевізника на основі прогнозу місячного вантажопотоку. Показано, що для вибору чисельності власного парку потрібен не точковий прогноз, а розподіл попиту, і сформульовано умову оптимальної чисельності парку через співвідношення постійних витрат на тягач та надбавки за залучення стороннього перевізника. На умовному ряді порівняно сезонну наївну модель, модель Хольта–Вінтерса та SARIMA за процедурою ковзного походження; виконано розрахунок витрат за п'ятьма політиками формування парку. Визначено обмеження підходу та напрями подальшої роботи.

Ключові слова: вантажопотік, прогнозування, часові ряди, провізна спроможність, парк рухомого складу, залучені перевізники.

The problem of planning the carrying capacity of an international road carrier on the basis of a monthly freight flow forecast is considered. It is shown that fleet sizing requires a demand distribution rather than a point forecast, and the condition of the optimal own-fleet size is formulated through the ratio of the fixed cost per tractor to the premium paid for subcontracted carriers. On a conditional series, the seasonal naive model, the Holt–Winters model and SARIMA are compared using a rolling-origin procedure; expected costs are calculated for five fleet-sizing policies. The limitations of the approach and directions for further work are outlined.

Key words: freight flow, forecasting, time series, carrying capacity, vehicle fleet, subcontracted carriers.

Постановка проблеми. Міжнародний автомобільний перевізник щопівроку чи щороку приймає рішення, яке важко відкликати: скільки тягачів тримати у власному парку. Надлишок парку — це простій і постійні витрати на лізинг, страхування, базову оплату водіїв; нестача — передача рейсів залученим перевізникам за вищою ставкою або відмова клієнту. Обидві помилки коштують по-різному, і саме ця асиметрія визначає, як користуватися прогнозом. У практиці підприємств прогноз вантажопотоку здебільшого будується як одне число на місяць — за минулим роком чи експертною оцінкою, — а резерв парку закладається «на око». Для планування провізної спроможності цього недостатньо: потрібен не точковий прогноз, а розподіл майбутнього попиту, з якого вже виводиться чисельність парку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Прогнозування показників роботи автотранспорту на регіональному рівні за трендовими моделями розглянуто у [6]; для оцінювання вантажопотоку на території застосовано модель з факторами відстані та чисельності населення [5]. Резервування провізних можливостей парку в ланцюгах постачань споживчих товарів досліджено у [7]. Порівняння економетричних і нейромережевих моделей для європейського перевізника виконано у [1]: для попиту ARIMA дає прийнятні результати, тоді як для ставок фрахту кращими виявилися нейронні мережі, а контрактні ставки повторюють спотові з лагом близько шести місяців. У [2] на реальних місячних даних 2020–2025 рр. порівняно наївну модель, ковзне середнє, моделі Брауна, Хольта, ETS і ARIMA за ковзним походженням з показниками MAE, RMSE, MAPE, MASE; показано, що найкраща модель залежить від прогнозованого показника, а інтервали прогнозу 80 і 95 % придатні для планування резервів парку. Підхід з навчанням з підкріпленням для оперативного прогнозу попиту запропоновано у [3]. Методичну основу — вибір моделі, оцінювання на ковзному походженні, інтервали прогнозу — викладено у [4], а шкальовані показники точності — у [8]. Разом з тим зв'язок між прогнозом і правилом формування парку в цих роботах здебільшого не формалізовано: прогноз закінчується там, де починається планування.

Виклад основного матеріалу. *Постановка задачі.* Нехай D_i — випадковий попит у місяці i (завантажених міжнародних рейсів), π — продуктивність тягача, рейсів за місяць, N — чисельність власного парку, стала на горизонті планування H місяців. Витрати перевізника за горизонт

складаються з постійних $N{\cdot}c_f{\cdot}H$, змінних на власні рейси c_o та оплати залучених рейсів c_s ($c_s > c_o$). Для кожного N очікувані витрати обчислюються за розподілом D_i, і оптимальне N^* *мінімізує їх. Умова оптимуму виводиться порівнянням граничних витрат і вигід одного додаткового тягача: його варто додати, доки частка місяців, у яких попит перевищує місткість власного парку* $N\pi$, *залишається більшою за* $c_f/(\pi(c_s - c_o))$. Тобто правило формування парку задається не прогнозом, а співвідношенням витрат; прогноз постачає лише розподіл, за яким ця частка обчислюється. Звідси й вимога до моделі: вона має давати не лише точкове значення, а й інтервали, узгоджені з фактичним розкидом.

Ілюстративний розрахунок. Параметри умовні (реальні дані підприємства є предметом кваліфікаційної роботи). Ряд місячних завантажених рейсів за 2023–2025 рр. згенеровано з трендом +0,4 % на місяць, сезонністю (спад у січні–лютому, піки у квітні та жовтні) та випадковою складовою з коефіцієнтом варіації 7 %. Три моделі — сезонна наївна, адитивна модель Хольта–Вінтерса (ETS) і SARIMA$(1,1,1)(0,1,1)_{12}$ — оцінено за ковзним походженням: 12 прогнозів на один місяць уперед для кожного місяця 2025 р., кожен — на моделі, навченій на попередніх даних (табл. 1).

Таблиця 1

Точність прогнозів на один місяць уперед (12 ковзних походжень, 2025 р.)

Модель	MAE, рейсів	RMSE, рейсів	MAPE, %	Зміщення, рейсів
Сезонна наївна	17,2	22,5	8,4	+15,8
Хольта–Вінтерса (ETS)	13,4	15,5	6,8	+4,2
SARIMA$(1,1,1)(0,1,1)_{12}$	27,7	34,4	14,1	+9,1

Сезонна наївна модель систематично занижує попит — зміщення +15,8 рейса — бо не бачить тренду. SARIMA на 24–35 спостереженнях виявилася найгіршою: для оцінки сезонних параметрів потрібно принаймні 4–5 повних циклів, а у перевізника, який веде облік два-три роки, їх немає. Для короткого ряду експоненційне згладжування практичніше. Прогноз моделі Хольта–Вінтерса на перше півріччя 2026 р. з 80 % інтервалом (5000 імітацій) наведено на рис. 1.

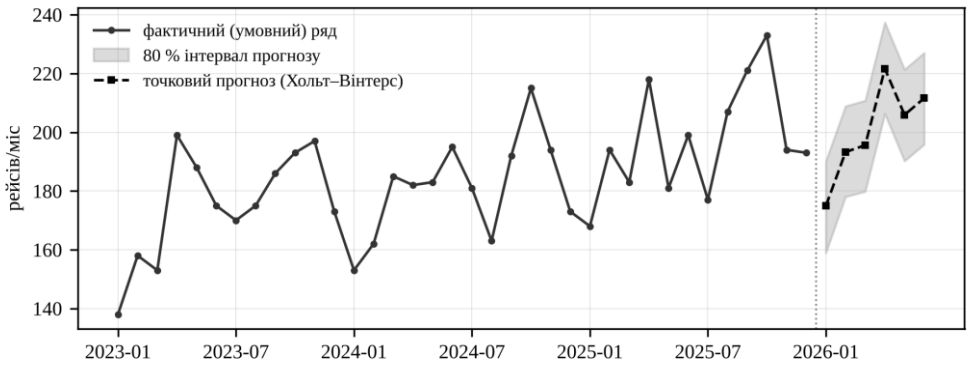

Рис. 1. Умовний ряд завантажених рейсів і прогноз на 2026 р.

Для розрахунку парку прийнято $\pi = 4$ рейси на тягач за місяць (цикл Луцьк – ЄС – Луцьк близько тижня з урахуванням простоїв), $c_f = 2000$ євро за тягач-місяць, $c_o = 1150$ і $c_s = 1700$ євро за рейс; горизонт — 6 місяців. Порівняно п'ять політик: парк за 10-, 50- та 90-процентним квантилем середньомісячного попиту (194, 200 і 207 рейсів), парк за верхньою межею пікового місяця і оптимум, знайдений перебором N за очікуваними витратами (табл. 2).

Таблиця 2

Очікувані витрати за політиками формування парку (6 місяців)

Політика формування власного парку	Тягачів, N	Частка залучених рейсів, %	Витрати, тис. євро
За нижньою межею середнього попиту (q_{10})	49	5,1	2004,4
За медіаною середнього попиту (q_{50})	51	3,0	2014,6
За верхньою межею середнього попиту (q_{90})	52	2,2	2021,3
За піковим місяцем (q_{90} квітня)	60	0,0	2102,8
Оптимум за очікуваними витратами	43	14,5	1994,5

Результат на перший погляд суперечить інтуїції: оптимальний парк (43 тягачі) менший за будь-який квантиль середнього попиту, а близько 15 % рейсів передається залученим перевізникам.

Пояснення — у співвідношенні витрат: простій одного рейсо-місця у власному парку коштує c_f/π = 500 євро, а надбавка за залучення — лише $c_s - c_o$ = 550 євро, тож гранична частка місяців з перевищенням попиту дорівнює 0,91, і власний парк доцільно тримати нижче попиту майже завжди. Формування парку «під пік» коштує на 5,4 % дорожче за оптимум, за медіаною — на 1,0 %. Чутливість до ставки залучення суттєва: при c_s = 1900 євро оптимум зсувається до 48 тягачів (частка залучених рейсів 6,4 %), при 2100 — до 50 (4,0 %). На дефіцитному ринку підрядників правило наближається до «парк за медіаною», на ринку з надлишком вільних перевізників — віддаляється від нього.

Вимоги до даних. Правило працює лише за умови, що ряд відображає попит, а не виконані рейси. Фактичний облік перевізника фіксує саме рейси, тобто попит, обрізаний згори місткістю парку: у місяці, коли замовлення відхилялися, ряд занижений, і модель, навчена на ньому, занижуватиме пік і наступного року. Тому поряд з виконаними рейсами підприємству доцільно вести облік відхилених і переданих стороннім перевізникам замовлень — без цього цензурування попиту непомітне, а помилка накопичується. Прогноз при цьому варто перераховувати щомісяця, а рішення про парк переглядати з тим кроком, з яким його чисельність реально змінити (квартал для лізингового парку, місяць для орендованого).

Обмеження. Розрахунок не враховує обмеження на залучення (у пікові місяці вільних перевізників може не бути за жодну ціну), втрату клієнта при відмові, лаг і витрати на зміну парку, а також різницю в якості сервісу власного та залученого рухомого складу. Ряд умовний; на реальних даних розподіл помилок може мати важкий правий хвіст через разові великі замовлення, і тоді імітація за нормальними залишками занижуватиме верхні квантилі.

Висновки. 1. Планування провізної спроможності потребує розподілу прогнозованого попиту, а не точкового значення; чисельність власного парку визначається співвідношенням постійних витрат на тягач і надбавки за залучення, тоді як прогноз лише задає розподіл, за яким обчислюється гранична частка місяців з перевищенням попиту.

2. Для коротких рядів (2–3 роки місячних даних) модель Хольта–Вінтерса дала MAPE 6,8 % проти 8,4 % у сезонної наївної та 14,1 % у SARIMA; остання на такому обсязі даних непридатна.

3. В ілюстративному розрахунку формування парку «під пік» коштує на 5,4 % дорожче за оптимум; подальша робота — калібрування моделі на фактичних даних перевізника, врахування обмеженої доступності залучених перевізників у пікові місяці та асиметрії розподілу помилок прогнозу.

Список використаних джерел

1. Liachovičius E., Šabanovič E., Skrickij V. Freight rate and demand forecasting in road freight transportation using econometric and artificial intelligence methods. *Transport.* 2023. Vol. 38, No. 4. P. 231–242. DOI: 10.3846/transport.2023.20932.

2. Konwerski J., Ziółkowski J. Multi-indicator forecasting of road freight transport workload for operational planning. *Applied Sciences.* 2026. Vol. 16, Iss. 13. Art. 6392. DOI: 10.3390/app16136392.

3. Al Hajj Hassan L., Mahmassani H. S., Chen Y. Reinforcement learning framework for freight demand forecasting to support operational planning decisions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review.* 2020. Vol. 137. Art. 101926. DOI: 10.1016/j.tre.2020.101926.

4. Hyndman R. J., Athanasopoulos G. Forecasting: Principles and Practice. 3rd ed. Melbourne: OTexts, 2021. URL: https://otexts.com/fpp3/

5. Кочина А. А. До питання визначенні величини транспортного потоку при доставці вантажів у ланцюгах постачань. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті.* 2022. № 2(19). С. 102–107. DOI: 10.36910/automash.v2i19.908.

6. Григорук П. М., Завгородня Т. П. Прогнозування показників роботи автотранспорту Хмельницької області. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки.* 2015. № 3, Т. 3. С. 42–48.

7. Ковцур К. Г. Резервування провізних можливостей парку автомобілів у логістичних ланцюгах постачань споживчих товарів: дис. … канд. техн. наук: 05.22.01. Харків: ХНАДУ, 2015. 256 с.

8. Hyndman R. J., Koehler A. B. Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting.* 2006. Vol. 22, No. 4. P. 679–688. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2006.03.001.

СТЕЛЬМАЩУК Валерій Віталійович — к.т.н., доцент, доцент кафедри транспортної логістики,

Луцький національний технічний університет, e-mail: v.stelmashchuk@lutsk-ntu.com.ua
КОВАЛЬ Олександр Анатолійович — здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти, група ТЛСм-11, Луцький національний технічний університет
Valerii STELMASHCHUK — Ph.D., Associate Professor, Department of Transport Logistics, Lutsk National Technical University, e-mail: v.stelmashchuk@lutsk-ntu.com.ua
Oleksandr KOVAL — Master's student, group TLSm-11, Lutsk National Technical University