УДК 656.025.4:519.872

В.П. Онищук
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТРИВАЛОСТІ ЧЕРГИ НА МИТНИЦІ ПРИ ВИКОНАННІ МІЖНАРОДНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Пункт пропуску на спільному автомобільному кордоні розглянуто як тандемну систему масового обслуговування з послідовними фазами контролю, нейтральною зоною скінченної місткості та блокуванням каналів після обслуговування. Показано, чому класична модель M/M/c систематично недооцінює хвіст розподілу часу очікування вантажного автомобіля. Запропоновано поєднання аналітичної оцінки, дискретно-подійної імітації та прогнозу на часових рядах. На умовних параметрах проілюстровано вплив додаткового каналу, розширення нейтральної зони, слотового режиму прибуття та режимних збоїв на середнє значення і 90-й процентиль часу очікування.

Ключові слова: пункт пропуску, міжнародні перевезення, система масового обслуговування, тандемна черга, блокування, імітаційне моделювання, єЧерга.

A road border crossing point shared by two states is treated as a tandem queueing system with consecutive control phases, a neutral zone of finite capacity and blocking-after-service of control lanes. It is shown why the classical M/M/c model systematically underestimates the tail of the truck waiting-time distribution. A combination of an analytical approximation, discrete-event simulation and time-series forecasting is proposed. Using conditional parameters, the effects of an extra lane, a larger neutral zone, slotted (e-queue) arrivals and operational disruptions on the mean and the 90th percentile of waiting time are illustrated.

Key words: border crossing point, international road haulage, queueing system, tandem queue, blocking, discrete-event simulation, e-queue.

Постановка проблеми. У міжнародних автомобільних перевезеннях час проходження пункту пропуску (у професійному вжитку – «митниці», хоча митний контроль є лише однією з фаз технологічної схеми пропуску) становить окрему складову тривалості рейсу, яка, на відміну від часу руху, погано піддається плануванню. На українсько-польську ділянку припадає близько третини вантажного автомобільного потоку через державний кордон, причому чотири з п'яти пунктів пропуску для вантажного транспорту працюють у режимі стійкого перевантаження [1], а час очікування в чергах нерідко перевищує 8–12 год [5]. Після запровадження єЧерги фізична черга значною мірою перетворилась на віртуальну, проте сумарний час очікування від цього не скоротився.

Для оперативного планування рейсів потрібна оцінка часу очікування для заданого моменту прибуття до пункту пропуску, а модель типу M/M/*c*, яку найчастіше застосовують для таких задач, не відповідає передумовам об'єкта. Мета роботи – обґрунтувати структуру моделі тривалості очікування на пункті пропуску, яка відтворює реальні механізми формування черги, та на ілюстративному прикладі оцінити порівняльну ефективність керівних впливів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вітчизняні дослідження пункту пропуску як системи масового обслуговування мають уже доволі довгу історію. У [2] пропускна спроможність автомобільного пункту пропуску моделювалась класичним апаратом СМО, у [3] встановлено причинно-наслідкові зв'язки між типами черг перед пунктами пропуску та їх кількісними характеристиками, в [4] для прогнозування інтенсивності роботи пунктів пропуску застосовано нейро-нечітку модель. Більшість цих робіт виконано до запровадження єЧерги, тобто для іншого режиму функціонування кордону.

Із нещодавніх публікацій показовою є [5], де митний пункт пропуску описано моделлю M/M/*c* з пуассонівським вхідним потоком та експоненційним обслуговуванням і показано, що збільшення кількості каналів з двох до п'яти скорочує очікування з 4,1 до 1,2 год. Отриманий результат є правдоподібним, однак передумови моделі не відповідають об'єкту: вхідний потік на кордоні нестаціонарний, час контролю не має експоненційного розподілу, а канали не є незалежними від стану суміжної сторони.

Закордонні роботи здебільшого стосуються американо-канадського та американо-мексиканського кордонів. У [6] для прогнозування затримки на пункті пропуску Peace Bridge

використано перехідні (нестаціонарні) розв'язки багатоканальних СМО типу $M/E_k/n$ та BMAP/PH/n, валідовані за мікроскопічною імітаційною моделлю; у [7] за даними про черги побудовано модель планування чисельності персоналу, а пізніші роботи додали до цього методи машинного навчання для прогнозу часу очікування. Спільна риса цих робіт – вони працюють з одностороннім пунктом пропуску, де вся технологія контролю зосереджена в одній юрисдикції. На українсько-польському кордоні контроль здійснюють дві сторони послідовно, і це має бути відображено в структурі моделі.

Нормативна основа єЧерги для вантажівок закладена експериментальним проєктом на Ягодині [8] та правилами 2025 року, що впровадили пріоритетні категорії (швидкопсувні вантажі, AEO, транзит за T1 і Carnet TIR) й обмежили перенесення броні [9] – для моделі це кілька класів заявок і некласична дисципліна черги.

Виклад основного матеріалу. *Структурна модель.* Пункт пропуску на спільному кордоні двох держав природно описується тандемною (багатофазною) СМО (рис. 1). Автомобіль послідовно проходить фазу контролю української сторони – прикордонний, митний, за потреби ваговий, фіто- чи ветеринарний, – потрапляє в нейтральну зону скінченної місткості K і далі в дзеркальну фазу контролю суміжної сторони. Ключовим механізмом є блокування після обслуговування: коли нейтральна зона заповнена, автомобіль, що завершив український контроль, не може звільнити канал, і канал залишається зайнятим без виконання обслуговування. Саме блокування переносить чергу «вгору за течією» і породжує важкі хвости розподілу часу очікування, яких моделі з незалежними фазами не відтворюють.

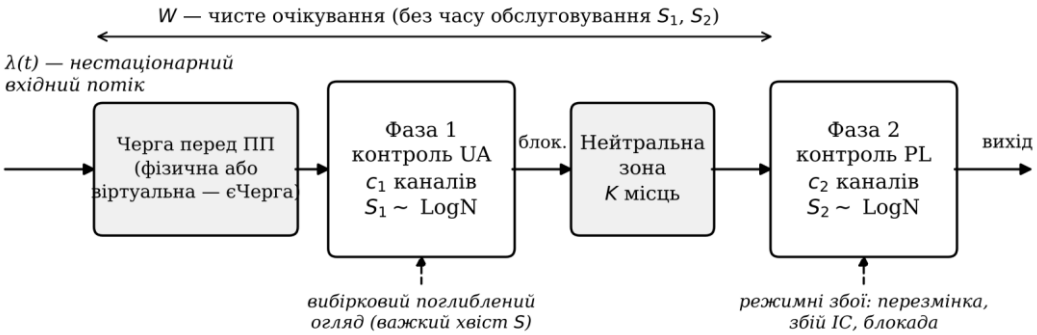

Рис. 1. Структурна схема пункту пропуску як тандемної СМО з блокуванням

Вхідний потік $\lambda(t)$. Він нестаціонарний – добовий цикл, тижневий, сезонність, – і для його опису у вільному режимі прибуття прийнятний неоднорідний пуассонівський процес. Але в режимі єЧерги потік перестає бути пуассонівським: система видає слоти з майже сталим темпом, автомобілі прибувають у межах слота з певним розкидом і з деякою часткою неявок. Час очікування при цьому не зникає – він переходить у віртуальну чергу, яку модель має враховувати як окрему компоненту.

Час обслуговування S. Технологічні схеми ДПСУ встановлюють граничну тривалість контролю для вантажного автомобіля, та фактичний час – величина з правосторонньою асиметрією: типове оформлення триває десятки хвилин, а вибірковий поглиблений огляд – години. Логнормальний розподіл з домішкою «важкого» компонента описує це краще за експоненційний, а коефіцієнт варіації S є одним з головних чинників довжини черги.

Режимні перемикання. Перезмінка, збій інформаційної системи, посилення контролю, блокада з того боку – усе це зупиняє або звужує одну з фаз на час, порівнянний з інтервалом обслуговування. У моделі це двостановий (чи багатостановий) процес, який керує кількістю активних каналів.

Інструменти. Аналітична оцінка для багатоканальної фази з довільними розподілами – через апроксимацію Аллена–Кунена [10] для фази з c каналами, коефіцієнтом завантаження ρ та коефіцієнтами варіації інтервалів прибуття c_a і обслуговування c_s:

$$W_q \approx \rho^{\sqrt{2(c+1)}-1} / (c(1-\rho)) \cdot (c_a^2 + c_s^2) / 2 \cdot \mathrm{E}[S], \quad (1)$$

дає порядок величини й чутливість до c_s, але не бачить ні блокування, ні перемикань. Дискретно-подійна імітація (SimPy, AnyLogic) відтворює обидва ефекти й дає повний розподіл W, а не тільки середнє. Прогноз на часових рядах (градієнтний бустинг, рекурентні мережі) придатний для оперативного планування рейсів, але не розкриває механізму формування черги і тому не замінює структурної моделі при проєктуванні пункту пропуску.

Ілюстративний розрахунок. Щоб показати, як працює модель, побудовано дискретно-подійну

імітацію тандемної СМО з блокуванням на умовних параметрах (табл. 1). Параметри не калібровано за даними конкретного пункту пропуску, тому наведені значення ілюструють механізми, а не є прогнозом.

Таблиця 1 – Параметри ілюстративної імітаційної моделі (умовні)

Параметр	Позначення	Значення
Середня інтенсивність прибуття; амплітуда добового / тижневого циклу λ(*t*)	λ	6,6 авт./год; 0,35 / 0,25
Кількість каналів контролю UA / PL	c_1 / c_2	4 / 4
Середній час контролю UA / PL	E[S_1] / E[S_2]	24 / 29 хв
Коефіцієнт варіації S_1 / S_2 (логнормальний)	c_s	0,45 / 0,55
Частка поглиблених оглядів / їх середня тривалість	p / E[S_d]	6 % / 55 хв
Місткість нейтральної зони	K	12 авт.
Збої на боці PL: середній інтервал / тривалість	–	14 год / 1,3 год (працює 1 канал)
Слотовий режим: частка неявок / розкид прибуття	–	8 % / σ = 20 хв

Розглянуто п'ять сценаріїв: S0 – базовий; S1 – додатковий канал на суміжній (вузькій) фазі; S2 – удвічі більша нейтральна зона; S3 – слотовий режим прибуття з тим самим реалізованим потоком, що й у S0; S4 – базовий, але без режимних збоїв. Горизонт – 30 діб із трьома добами розігріву, 12 реплікацій; очікування *W* рахується чистим, без часу обслуговування. Результати зведено у табл. 2 і на рис. 2.

Таблиця 2 – Характеристики часу очікування *W* за сценаріями (середнє за 12 реплікаціями)

Сценарій	Середнє *W*, год	Медіана, год	*p*90, год	*W* > 6 год, %	Блокування UA, % часу
S0 – базовий	5,5 ± 2,0	4,9	11,4	38	15
S1 – +1 канал PL	1,2 ± 0,2	0,7	3,3	2	3
S2 – нейтральна зона ×2	4,8 ± 0,8	4,2	10,3	33	11
S3 – слотовий потік	1,9 ± 1,0	1,4	4,4	6	9
S4 – без режимних збоїв	2,2 ± 0,4	1,8	5,3	7	7

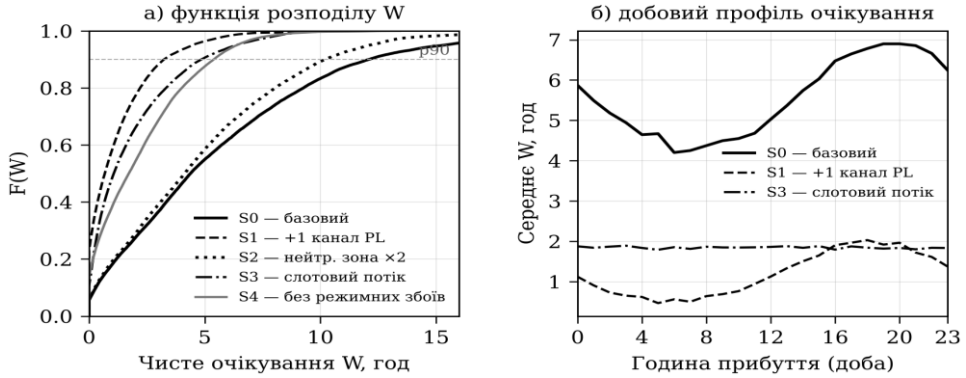

Рис. 2. Функція розподілу *W* (а) та середнє *W* залежно від години прибуття (б)

Аналіз результатів дає підстави для таких тверджень.

По-перше, у базовому сценарії близько 75 % чистого очікування припадає на фазу перед українським контролем, хоча вузьким місцем є суміжна фаза (ρ_{PL} = 0,89 проти ρ_{UA} = 0,75): черга формується вгору за течією від вузького місця, оскільки канали першої фази 15 % часу заблоковані заповненою нейтральною зоною. Розкид між реплікаціями (± 2,0 год) свідчить про нестійкість системи за ρ ≈ 0,9.

По-друге, розширення нейтральної зони (S2) дає незначний ефект – середнє *W* зменшується з 5,5 до 4,8 год, а 90-й процентиль перевищує 10 год. Буфер перерозподіляє чергу між фазами, не змінюючи пропускної здатності системи.

По-третє, режимні збої (S0 проти S4) впливають на очікування непропорційно до втраченої

пропускної здатності. За канало-часом вони становлять близько 6 % пропускної здатності суміжної фази (збій тривалістю ~1,3 год раз на 14 год, під час якого з чотирьох каналів діє один), проте збільшують середнє очікування у 2,5 раза, а частку автомобілів з очікуванням понад 6 год – із 7 до 38 %. Додатковий канал (S1) дає сильніший ефект (5,5 → 1,2 год), але означає збільшення пропускної здатності на 25 % з відповідними капітальними та кадровими витратами; у розрахунку на одиницю пропускної здатності режимні збої є найвагомішим з розглянутих чинників, і їх статистика має входити до моделі нарівні з кількістю каналів.

По-четверте, слотовий режим прибуття (S3) за того самого потоку скорочує фізичне очікування майже втричі. Проте модель не враховує очікування у віртуальній черзі між бронюванням і слотом, яке для перевізника є таким самим простоєм; коректне порівняння потребує об'єднаної моделі віртуальної та фізичної черги, що є завданням наступного етапу.

Обмеження. Головне обмеження пов'язане з даними. У відкритому доступі є довжина черги й орієнтовний час очікування за пунктами пропуску, але відсутні пофазна тривалість контролю, місткість нейтральних зон і статистика режимних збоїв. Параметри моделі доведеться відновлювати розв'язанням зворотної задачі – за умовою відтворення спостережуваного розподілу W, – проте така ідентифікація не є однозначною: одну й ту саму чергу можна пояснити і повільним обслуговуванням, і частими збоями. Розрізнити ці чинники дозволять натурні хронометражні спостереження на пункті пропуску або дані журналів єЧерги.

Висновки. 1. Пункт пропуску на спільному кордоні слід моделювати як тандемну СМО з нестаціонарним вхідним потоком, логнормальним обслуговуванням, нейтральною зоною скінченної місткості та блокуванням після обслуговування; модель M/M/c для цього об'єкта систематично занижує хвіст розподілу часу очікування.

2. Ілюстративна імітація показала, що черга формується вгору за течією від вузького місця, розширення нейтральної зони не змінює пропускної здатності, а найсильніший важіль – додатковий канал на вузькій фазі; режимні збої при цьому впливають на очікування непропорційно до втраченої ними пропускної здатності (близько 6 % канало-часу дають 2,5-кратне зростання середнього очікування).

3. Слотовий режим прибуття скорочує фізичну чергу, але переносить очікування у віртуальну; подальша робота – побудова об'єднаної моделі віртуальної та фізичної черги з класами пріоритету і калібрування за даними конкретного пункту пропуску.

Список використаних джерел

1. Максименко А. Аналіз обсягу вантажних потоків через українсько-польську ділянку державного кордону. *Економіка та суспільство.* 2023. № 47. DOI: 10.32782/2524-0072/2023-47-25.

2. Пасічник А. М., Шуть С. П., Клен О. М. Моделювання та дослідження пропускної спроможності автомобільних пунктів пропуску. *Вісник Академії митної служби України. Сер.: Технічні науки.* 2013. № 1(49). С. 5–11.

3. Дмитренко О., Боровик О. Причинно-наслідкові зв'язки між типами черг автотранспортних засобів перед автомобільними пунктами пропуску та їх кількісними характеристиками. *Збірник наукових праць НАДПСУ. Сер.: Військові та технічні науки.* 2013. № 1(59). С. 97–108.

4. Андрушко В. З. Методика прогнозування інтенсивності роботи пунктів пропуску із застосуванням нейро-нечіткої моделі. *Збірник наукових праць НАДПСУ. Сер.: Військові та технічні науки.* 2014. № 2. С. 6–20.

5. Хомяк А. Е., Баранов І. О., Кіріцева О. В. Підвищення ефективності міжнародних перевезень деревини автомобільним транспортом. *Наука та виробництво.* 2025. Вип. 30. С. 207–217. DOI: 10.31498/2522-9990302025347249.

6. Lin L., Wang Q., Sadek A. W. Border crossing delay prediction using transient multi-server queueing models. *Transportation Research Part A: Policy and Practice.* 2014. Vol. 64. P. 65–91. DOI: 10.1016/j.tra.2014.03.013.

7. Yu M., Ding Y., Lindsey R., Shi C. A data-driven approach to manpower planning at U.S.–Canada border crossings. *Transportation Research Part A: Policy and Practice.* 2016. Vol. 91. P. 34–47.

8. Про особливості реалізації експериментального проекту з організації управління чергами вантажних автомобілів перед МПП «Ягодин – Дорогуськ» за допомогою електронної системи: Постанова КМУ від 02.12.2022 № 1349.

9. єЧерга для вантажівок: затверджено нові правила функціонування системи. Урядовий портал. 2025. URL: https://www.kmu.gov.ua/news/yecherha-dlia-vantazhivok-zatverdzheno-novi-pravyla-funktsionuvannia-systemy

10. Gross D., Shortle J. F., Thompson J. M., Harris C. M. Fundamentals of Queueing Theory. 5th ed. Hoboken: Wiley, 2018. 576 p.

ОНИЩУК Василь Петрович – к.т.н., доцент, завідувач кафедри транспортної логістики, Луцький національний технічний університет, e-mail: v.onyshchuk@lntu.edu.ua
Vasyl ONYSHCHUK – Ph.D., Associate Professor, Head of the Department of Transport Logistics, Lutsk National Technical University, e-mail: v.onyshchuk@lntu.edu.ua