

**Прокудін Г.С.**

Національний транспортний університет

**Назарова А.П.**

Національний транспортний університет

**Прокудіна І.І.**

Національний транспортний університет

## ОПТИМІЗАЦІЯ ЛОГІСТИЧНИХ ЛАНЦЮГІВ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ У МІЖНАРОДНОМУ СПОЛУЧЕННІ

У статті розглядається модель аналізу логістичних ланцюгів доставки вантажів, яка представлена у вигляді мережі систем масового обслуговування. Ця мережа імітує технологічні процеси доставки вантажів від вантажовідправника до вантажоодержувача, забезпечує адекватне реагування на ситуації, що виникають у процесі її функціонування, і дозволяє коригувати значення окремих параметрів і характеристик мережі (кількість каналів, інтенсивність обслуговування і т. д.) з метою підвищення ефективності роботи мережі та забезпечення оптимального процесу обслуговування вимог щодо доставки вантажів у міжнародному сполученні.

Структура технологічного процесу доставки партії вантажу описується структурою логістичного ланцюга, що відбиває послідовність участі у процесі доставки різних суб'єктів ринку транспортних послуг. При цьому необхідно розрізняти задачу вибору оптимальної структури логістичного ланцюга та завдання вибору оптимального перевізника (логістичного оператора, підрядника на виконання окремих видів робіт, вантажного терміналу, контрольно-пропускного пункту тощо) або оптимального маршруту доставки. Вибір оптимальних варіантів логістичних ланцюгів доставки вантажів здійснюється на основі альтернативних варіантів, що багато в чому визначає ефективність вантажоперевезень.

У логістичному ланцюгу, що відображає технологічний процес доставки вантажів, циркулюють вантажопотоки, інформаційні потоки та фінансові потоки. Саме технологічний процес доставки вантажів з усіма його складовими моделюється з використанням математичного апарату теорії масового обслуговування як мережі систем масового обслуговування.

У статті представлено реалізацію моделі для аналізу логістичного ланцюга доставки вантажів у середовищі електронних таблиць Excel з метою знаходження середньої кількості вимог у мережі.

**Ключові слова:** вантажні перевезення, логістичний ланцюг, мережа систем масового обслуговування, оптимізація, середня кількість вимог, міжнародне сполучення.

**Постановка проблеми.** Суб'єкти транспортного ринку, що беруть участь у процесі доставки вантажів, і в першу чергу відправники вантажу, часом відчувають труднощі у виборі найбільш ефективного варіанту логістичного ланцюга (ЛЦ), а також кількісного складу її компонентів. Модель аналізу логістичних ланцюгів доставки вантажів, представлена у вигляді мережі систем масового обслуговування, імітує технологічні процеси доставки вантажів від вантажовідправника до вантажоодержувача, забезпечує адекватне реагування на ситуації, що виникають в процесі її

функціонування, і дозволяє коригувати значення окремих параметрів і характеристик мережі (кількість каналів, інтенсивність обслуговування та забезпечення процесу вантажів до інтенсивності обслуговування і т.д.) з метою підвищення міжнародне повідомлення (МС).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі Ширяєвої С.В. та Свіріна Д.О. [1] досліджено ланцюги поставок вантажів при міжнародних автомобільних перевезеннях вантажів, зокрема: принципова схема та загальна структура ланцюга поставок, основні типи ланцюгів поста-

вок та варіанти ланцюгів поставок. На жаль, зміст цих досліджень має узагальнений характер, не конкретизується і не відображає специфіку вантажоперевезень в СНД.

Автори Лиса С.С. та Зіміна А.І. [2] у своїй статті висвітлюють проблеми та перспективи розвитку ринку холодної логістики в Україні, а саме аналізують підходи до трактування понять «холодні ланцюги поставок», «холодна логістика» та «логістика вантажів, що швидко псуються», які можуть використовуватися як синоніми. Також розглядається питання управління холодними ланцюгами постачання та визначаються ключові логістичні рішення для ефективного управління. Надано оцінку поточного стану логістичного обслуговування холодних ланцюгів поставок в Україні. Стаття має виключно описово-статистичний характер.

У статті авторів Набокі Р.М. та Шукліної В.В. [3], присвяченій впливу інтеграції логістики поставок підвищення потенціалу підприємства, встановлено, що інтегрована логістика поставок дозволяє найефективніше реалізувати мети підприємства, сприяти виходу підприємства з економічної кризи. Зроблено висновок про те, що інтеграція логістики постачання дозволяє досягти синергетичного ефекту діяльності підприємства. Зміст статті має декларативний характер і не містить конкретних заходів щодо реалізації мети інтегрованої логістики поставок.

**Постановка завдання.** Метою статті є підвищення ефективності прийняття рішень під час управління логістичними ланцюжками доставки вантажів у МС.

**Виклад основного матеріалу.** Структура технологічного процесу доставки партії вантажу описується структурою ЛЛ, що відбиває послідовність участі у процесі доставки різних суб'єктів

транспортного процесу. Вибір оптимальних варіантів логістичних ланцюгів доставки вантажів складається на основі альтернативних варіантів, що багато чому визначає ефективність вантажоперевезень [4]. Розглянемо найпоширеніший варіант ЛЛ для доставки вантажів автомобільним транспортом у МС (рис. 1).

Для ЛЛ доставки вантажів початковою ланкою, що формує вантажопотік, є відправник вантажу ( $FO$  – *freight owner*), а кінцевою – отримувач вантажу ( $FC$  – *freight customer*). Фізичне переміщення вантажопотоку ( $\rightarrow$ ) здійснюється перевізниками країни вантажовідправника  $A$  ( $C^A$  – *carrier*), причому спочатку перевізником  $C_1^A$ , який доставляє вантаж на вантажний термінал країни вантажовідправника  $FT^A$  ( $FT$  – *freight terminal*), а потім перевізником  $C_2^A$  від вантажного терміналу  $FT^A$  до митного поста ( $CP$  – *customs post*). У разі наявності у відправника вантажу власного рухомого складу він використовується замість перевізника  $C_1^A$ .

Функцію організації процесу переміщення вантажопотоків реалізує експедитор країни вантажовідправника  $A$  ( $FF^A$  – *freight forwarder*). Як організатор процесу реалізації потреби у переміщенні вантажу, експедитор є ланкою в ЛЛ, на якому замикаються інформаційні потоки ( $\leftrightarrow$ ). Оскільки відправник вантажу для реалізації своєї потреби в переміщенні вантажу звертається до експедитора  $FF^A$ , то фінансові потоки ( $\dashrightarrow$ ) в ЛЛ проходять, перш за все, від відправника вантажу до експедитора, а потім до інших учасників ЛЛ.

З'єднання ЛЛ на рисунку 1 країни одержувача  $B$  повністю симетричні з'єднанням ЛЛ країни відправника вантажу  $A$  і виконують самі теж функції, тобто:

$$FO \rightarrow C_1^A \rightarrow FT^A \rightarrow C_2^A \rightarrow CP \sim CP \rightarrow C_1^B \rightarrow FT^B \rightarrow C_2^B \rightarrow FC$$

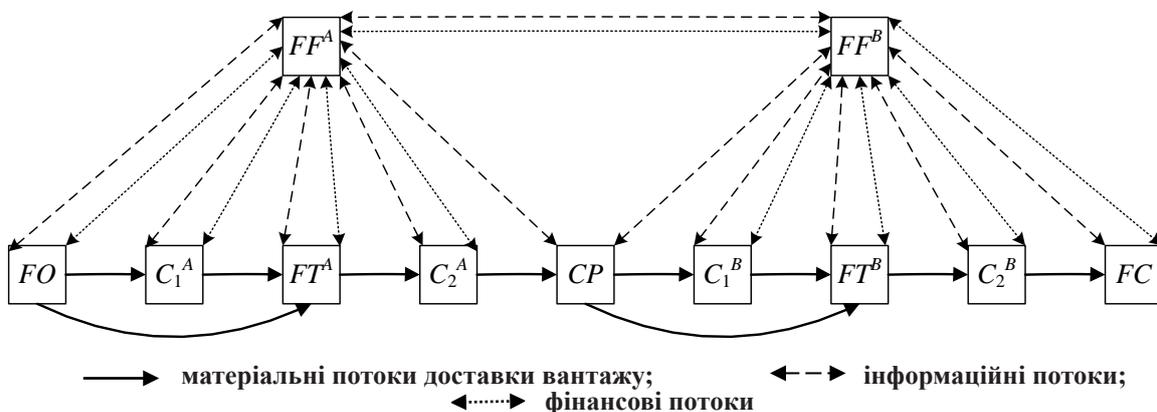


Рис. 1. ЛЛ доставки вантажів автомобільним транспортом у МС

Особливістю цих ланцюгів є те, що початкові та кінцеві ланки змінюються відповідно з  $FO$  на  $CP$  та з  $CP$  на  $FC$ , але функціонально вони ідентичні. Крім того, у цьому ЛЛ замість перевізника  $C_1^B$  може використовуватися перевізник  $C_2^A$ .

Для координації доставки вантажу від відправника  $FO$  до отримувача  $FC$  схема ЛЛ відображає інформаційні та фінансові зв'язки між експедиторами двох країн, а саме між  $FF^A$  і  $FF^B$ . Перевізники можуть доставляти партію вантажу від відправника до одержувача не тільки між двома країнами, а й між кількома. Для цього схема ЛЛ доповнюється зв'язками  $CP \rightarrow C_1^X \rightarrow FT^X \rightarrow C_2^X \rightarrow FC$  відповідної країни  $X$ . Формально ЛЛ ( $LC$  – *logistics chain*) має наступну структуру:

$$LC = \{FO; FF^A; C_1^A; FF^B; C_2^A; CP; FF^B; C_1^B; FT^B; C_2^B; FC\} \quad (1)$$

- де  $FO$  – вантажовідправник;
- $FF^A$  – експедитор в країні  $A$ ;
- $FF^B$  – експедитор в країні  $B$ ;
- $C_1^A; C_2^A$  – перевізники в країні  $A$ ;
- $C_1^B; C_2^B$  – перевізники в країні  $B$ ;
- $FT^A$  – вантажний термінал в країні  $A$ ;
- $FT^B$  – вантажний термінал в країні  $B$ ;
- $CP$  – пункт пропуску на митниці;
- $FC$  – вантажоотримувач.

Для розробки математичного апарату мережі системи масового обслуговування (СМО) [5] уявімо її можливі стани (рис. 2). Також для спрощення моделі вхідні потоки вантажних партій, що надходять до відправника вантажу і розподі-

ляються від отримувача вантажу, об'єднані в одне зовнішнє джерело (ЗД – 0), представлені на рис. 2. На основі рис. 2 побудована матриця передачі (2), що дозволяє визначити напрями інтенсивностей внутрішніх потоків у системі, де ЗД – зовнішнє джерело або середовище, а  $P_{ij}$  – ймовірність виходу заявки з  $i$ -ї системи в  $j$ -ю.

Прийнемо, що в матриці передач має місце:

$$\sum_{j=0}^M P_{ij} = 1, \quad i = 0, 1, 2, \dots, M. \quad (3)$$

де  $M$  – кількість СМО (у нашому випадку  $M = 11$  з 0-им зовнішнім середовищем).

При цьому інтенсивність вхідного потоку становить:

$$\lambda_0 = \lambda_1. \quad (4)$$

З статистичних даних ймовірність використання орендованого автомобільного транспорту країни  $A$ , саме  $P_{13}$ , під час здійснення вантажоперевезень становить 10%, тобто. 0,1 або використання власного рухомого складу  $P_{14}$  (за наявності) – 30%, тобто. 0,3; використання експедитором  $FF^A$  країни  $A$  послуг перевізників  $C_1^A, C_2^A$ , вантажного терміналу  $FT^A$ , митного пункту пропуску  $CP$  і експедитора  $FF^B$  країни  $B$  оцінюється з такою самою ймовірністю, саме 20%, тобто. 0,2; ймовірність використання орендованого автомобільного транспорту країни  $B$ , саме  $P_{67}$ , під час здійснення вантажоперевезень становить 25%, тобто. 0,25, або використання власного рухомого складу  $P_{69}$  (за наявності) – 75%, тобто. 0,75; використання експедитором  $FF^B$  країни  $B$  послуг перевізників

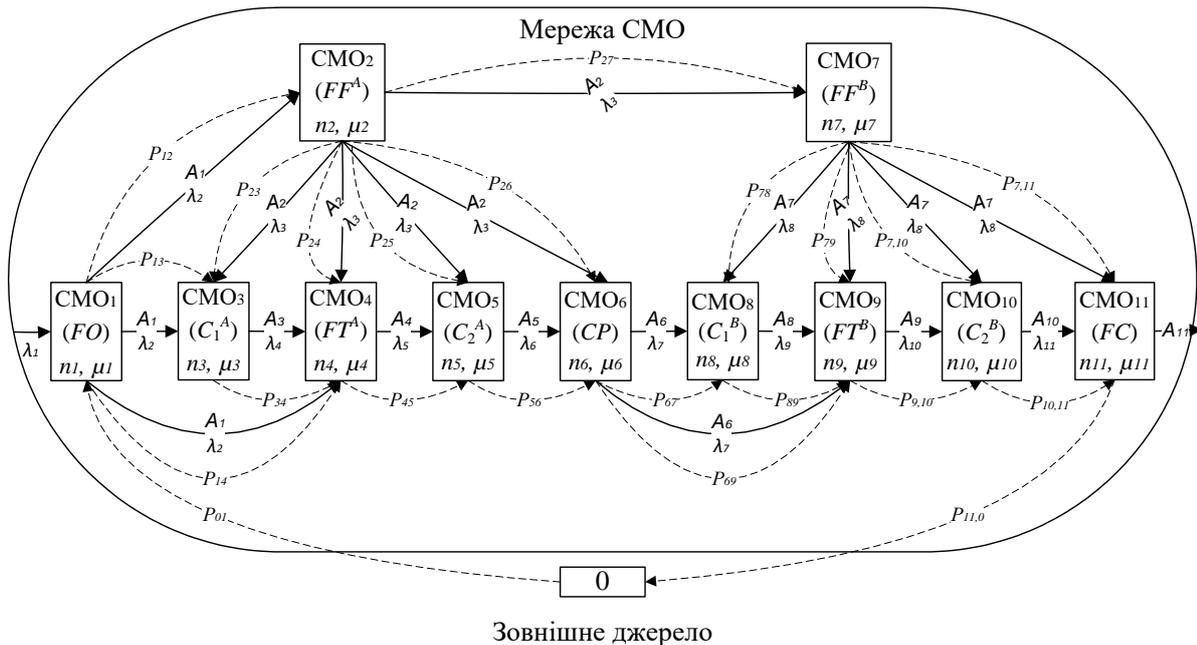


Рис. 2. Графи станів та передач мережі СМО

$C_1^B, C_2^B$ , вантажного терміналу  $FT^B$  і одержувача  $FC$  оцінюється з однаковою ймовірністю – 25%, тобто, 0,25. Тоді, виходячи з (2)–(4), отримуємо:

$$\begin{cases} P_{12} = 0.6 & P_{67} = 0.25 & P_{9,10} = 1.0 \\ P_{13} = 0.1 & P_{69} = 0.75 & P_{10,11} = 1.0 \\ P_{14} = 0.3 & P_{78} = 0.25 & P_{11,0} = 1.0 \\ P_{23} = 0.2 & P_{79} = 0.25 & P_{01} = 1.0 \\ P_{24} = 0.2 & P_{7,10} = 0.25 & P_{34} = 1.0 \\ P_{25} = 0.2 & P_{7,11} = 0.25 & P_{45} = 1.0 \\ P_{26} = 0.2 & P_{56} = 1.0 & \\ P_{27} = 0.2 & P_{89} = 1.0 & \end{cases} \quad (5)$$

Передбачається, що ймовірність того, що запит, що виходить із системи  $i$ , буде направлений у систему  $j$ , не залежить від попереднього шляху цього запиту та стану мережі загалом. Отже, якщо існує стійкий стан, то

$$\lambda_j = \sum_{i=0}^M \lambda_i \cdot P_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, M. \quad (6)$$

У цьому виразі  $\lambda_0$  позначає інтенсивність джерела. Звідки одержуємо:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \lambda_0 \cdot P_{01} & \lambda_2 = \lambda_0 \cdot P_{23} + \lambda_1 \cdot P_{45} & \lambda_3 = \lambda_0 \cdot P_{68} + \lambda_2 \cdot P_{79} + \lambda_1 \cdot P_{89} \\ \lambda_2 = \lambda_1 \cdot P_{12} & \lambda_6 = \lambda_2 \cdot P_{26} + \lambda_5 \cdot P_{56} & \lambda_{10} = \lambda_7 \cdot P_{7,10} + \lambda_9 \cdot P_{9,10} \\ \lambda_3 = \lambda_1 \cdot P_{13} + \lambda_2 \cdot P_{23} & \lambda_7 = \lambda_2 \cdot P_{27} + \lambda_6 \cdot P_{67} & \lambda_{11} = \lambda_7 \cdot P_{7,11} + \lambda_{10} \cdot P_{10,11} \\ \lambda_4 = \lambda_1 \cdot P_{14} + \lambda_2 \cdot P_{24} + \lambda_3 \cdot P_{34} & \lambda_8 = \lambda_7 \cdot P_{78} & \end{cases} \quad (7)$$

Оскільки  $\lambda_1$  відома, значення інших інтенсивностей можна знайти з допомогою системи рівнянь. Розрахувавши відповідні значення  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{11}$ , можна за відповідних інтенсивностей  $\mu_1, \dots, \mu_{11}$  (ширинах смуги пропускання СМО) отримати основні характеристики мережі СМО. Отримуючи ці характеристики, можна збільшувати чи зменшувати кількість каналів чи кількість місць у чергах очікування різних СМО з метою поліпшення її функціонування [6].

В результаті аналізу технологічних процесів доставки вантажів від відправника вантажу до його одержувача, пов'язаних з проходженням окремих ланок ЛЛІ, а саме СМО (див. рис. 2), прийняті наступні позначення: СМО<sub>1</sub> ( $FO$ ) – багатоканальна система без обмежень по черзі очікування; всі інші десять СМО, а саме СМО<sub>2</sub> ( $FF^A$ ), СМО<sub>3</sub> ( $C_1^A$ ), СМО<sub>4</sub> ( $FT^A$ ), СМО<sub>5</sub> ( $C_2^A$ ), СМО<sub>6</sub> ( $CP$ ), СМО<sub>7</sub> ( $FF^B$ ), СМО<sub>8</sub> ( $C_1^B$ ), СМО<sub>9</sub> ( $FT^B$ ), СМО<sub>10</sub> ( $C_2^B$ ), СМО<sub>11</sub> ( $FC$ ) – багатоканальні системи з обмеженою кількістю місць для очікування. Середній час виконання заявок у мережі СМО буде визначено:

$$\bar{t}_M^0 = \sum_{i=1}^m \bar{t}_{суст}^i, \quad (8)$$

$$\bar{t}_{суст}^i = \bar{t}_{чек}^i + \bar{t}_{обс}^i, \quad i = \overline{1, M} \quad (9)$$

де  $\bar{t}_{суст}^i, \bar{t}_{чек}^i, \bar{t}_{обс}^i$ , відповідно, середній час перебування вимоги в  $i$ -тій системі, середній час чекання в черзі чекання та середній час її обслуговування.

У цьому можна врахувати як структуру кожної системи, і її можливі втрати під час обслуговування. Для цього застосуємо відповідні формули [7]. Величини  $\bar{t}_{суст}^i$  визначаються наступним чином:

1) Для СМО<sub>1</sub> – багатоканальної системи без обмежень на чергу чекання:

$$\bar{t}_{суст}^i = \bar{t}_{чек}^i + \bar{t}_{обс}^i = \frac{\bar{\tau}_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\lambda_i}, \quad \bar{\tau}_i = \frac{\rho_i^{n_i+1}}{n_i \times n_i! \cdot (1 - \chi_i)^2}, \quad i = 1; \quad (10)$$

$$P_0 = [1 + \frac{\rho_i}{1!} + \frac{\rho_i^2}{2!} + \dots + \frac{\rho_i^{n_i}}{n_i!} + \frac{\rho_i^{n_i+1}}{n_i! \cdot (n_i - \rho_i)}]^{-1}, \quad (11)$$

де  $\rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}$  – приведена інтенсивність вимог в  $i$ -тій системі;

$\chi_i = \frac{\rho_i}{n}$  – приведена інтенсивність вимог одного каналу в  $i$ -тій системі;

$n$  – кількість каналів;  $P_0$  – імовірність відсутності у системі вимог.

Слід зазначити, що з систем без обмежень по чергах наявність стійкого режиму забезпечується за умови:  $\rho_i < n$ .

2) Для СМО<sub>2</sub>, СМО<sub>3</sub>, СМО<sub>4</sub>, СМО<sub>5</sub>, СМО<sub>6</sub>, СМО<sub>7</sub>, СМО<sub>8</sub>, СМО<sub>9</sub>, СМО<sub>10</sub>, СМО<sub>11</sub> – багатоканальних систем з обмеженою кількістю місць для очікування:

$$\bar{t}_{суст}^i = \bar{t}_{чек}^i + \bar{t}_{обс}^i = \frac{\bar{\tau}_i + q_i}{\lambda_i + \mu_i}, \quad \bar{\tau}_i = \frac{\rho_i^{n_i+1}}{n_i \cdot n_i!} \cdot P_0 \cdot \frac{1 - (l_i + 1) \cdot \chi_i^{l_i} + l_i \cdot \chi_i^{l_i+1}}{(1 - \chi_i)^2}, \quad i = \overline{2, 11}; \quad (12)$$

$$P_0 = [1 + \frac{\rho_i}{1!} + \frac{\rho_i^2}{2!} + \dots + \frac{\rho_i^{n_i}}{n_i!} + \frac{\rho_i^{n_i}}{n_i!} \cdot \frac{\rho_i / n_i - (\rho_i / n_i)^{l_i+1}}{1 - \rho_i / n_i}]^{-1}, \quad (13)$$

де  $l$  – кількість місць для очікування в черзі.

Середня кількість запитів у мережі визначається за формулою Літла:

$$\bar{z} = \bar{t}_M^0 * \lambda_0. \quad (14)$$

Розроблена методика аналізу мережі СМО передбачає адекватне реагування на виникаючі в процесі її функціонування ситуації та дозволяє корегувати значення тих чи інших параметрів та характеристик мережі (кількість каналів, інтенсивність обслуговування і таке інше) з метою покращення роботи мережі та забезпечення оптимального процесу обслуговування вимог на доставку вантажів у МС [8].

На рисунку 3 показана реалізація моделі аналізу ЛЛІ доставки вантажів у середовищі електронних таблиць Excel для визначення середньої кількості вимог у мережі. Кількість каналів (від одного до трьох) та довжина черг очікування (від однієї до двох) у кожному СМО також використовуються як змінні параметри цієї моделі оптимізації. Результатом є значення середньої кількості вимог у мережі, що дорівнює 35 замовлень на годину при інтенсивності вхідного потоку замовлень 12 одиниць на годину.

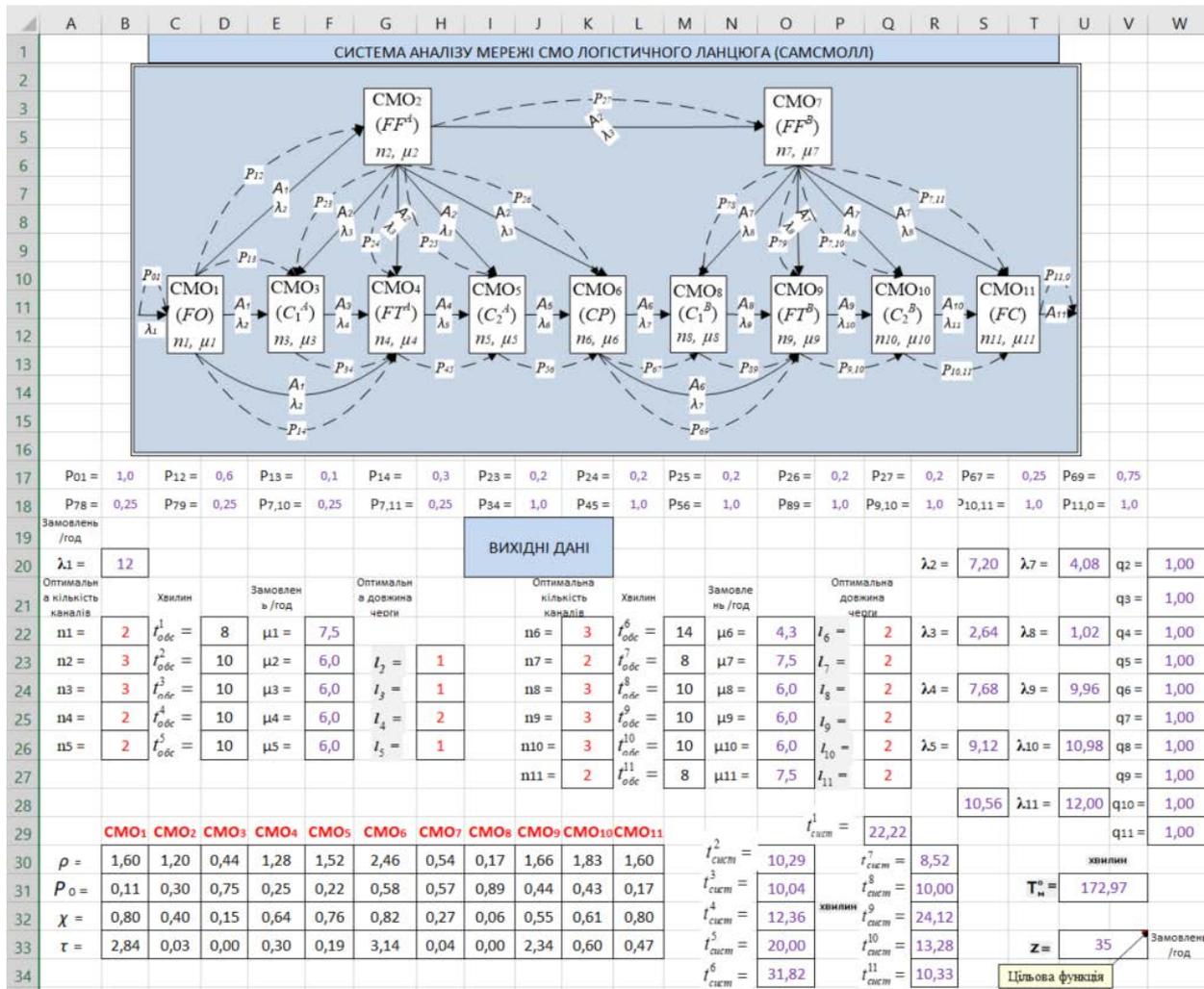


Рис. 3. Система аналізу мережі СМО ЛЛ доставки вантажів (знаходження середньої кількості вимог, що знаходиться в мережі)

Запропонована модель аналізу логістичних ланцюгів доставки вантажів, представлена у вигляді мережі СМО, моделює технологічні процеси доставки вантажів від відправника вантажу до його одержувача та використовується у навчальному процесі кафедри міжнародних перевезень та митного контролю Національного транспортного університету.

Планується реалізація цієї моделі за допомогою об'єктно-орієнтованої мови програмування. Після завершення досліджень планується передача розробленого методичного та програмного забезпечення до науково-консультаційного центру Асоціації міжнародних автомобільних перевізників України для використання у навчальному процесі підготовки управлінських кадрів автотранспортних підприємств транспортної галузі України.

Список літератури:

1. Ширяєва С.В., Свірін Д.О. Дослідження логістичних ланцюгів постачань при виконанні міжнародних автомобільних перевезень вантажів. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. 2017. Вип. 1 (37). С. 459–466. <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/37/459.pdf>
2. Лиса С.С., Зіміна А.І. Проблеми та перспективи розвитку ринку холодної логістики України. *Електронний науково-практичний журнал «Інфраструктура ринку»*. Причорноморський інститут економіки та інновацій, 2020. Вип. 44. С. 87–92. <https://doi.org/10.32843/infrastruct44-15>
3. Набока Р.М., Шукліна В.В. Вплив інтеграції логістичних ланцюгів поставок на підвищення потенціалу підприємства. *Електронне наукове фахове видання «Ефективна економіка»*. Дніпровський державний аграрно-економічний університет, ТОВ «ДКС Центр», 2020. Вип. № 4. С. 1–6. <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2020.4.87>

4. Прокудін Г.С., Назарова А.П. Моделі альтернативних варіантів логістичних ланцюгів доставки вантажів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: «Технічні науки»*. Том 34 (73) № 2, 2023, С. 189–193. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/32>

5. Литвинов А.Л. Теорія систем масового обслуговування : навч. посібник; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 141 с.

6. Прокудін Г.С., Назарова А.П., Хоботня Т.Г., Прокудіна І.І. Система аналізу мережі СМО логістичних ланцюгів доставки вантажів. *Міжнародна науково-практична конференція “Розумний транспорт та інтегровані транспортні технології”*. С. 47–49. (21-22 листопада 2023 року). Харківський національний автомобільно-дорожній університет. Харків. Україна.

7. Кунда Н.Т. Дослідження операцій у транспортних системах. *Навч. посібник для студ. напрямку “Транспортні технології” вищ. навч. закладів*. К.: Видавничий Дім “Слово”, 2008. 400 с.

8. Прокудін Г.С., Прокудін О.Г., Назарова А.П. Система аналізу логістичних ланцюгів доставки вантажів. *Вісник Національного транспортного університету. Науково-технічний збірник*. Серія «Технічні науки» та серія «Економічні науки». Вип. № 3 (57). 2023. С. 99–109. <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/57/099.pdf>.

### **Prokudin G.S., Nazarova A.P., Prokudina I.I. OPTIMIZATION OF LOGISTIC CHAINS OF CARGO DELIVERY IN INTERNATIONAL COMMUNICATION**

*The article considers a model for analyzing logistics chains for cargo delivery, which is presented in the form of a network of mass service systems. This network simulates the technological processes of cargo delivery from the consignor to the consignee and provides for an adequate response to situations arising during its operation and allows adjusting the values of certain parameters and characteristics of the network (number of channels, service intensity, etc.) in order to improve the network operation and ensure the optimal process of servicing requirements for cargo delivery in international traffic.*

*The structure of the technological process of delivering a consignment of cargo is described by the structure of the logistics chain, which reflects the sequence of participation in the delivery process of various transport market entities. In this case, it is necessary to distinguish the task of choosing the optimal structure of the logistics chain from the task of choosing the optimal carrier (logistics operator, contractor for performing certain types of work, cargo terminal, checkpoint, etc.) or the optimal delivery route. The selection of optimal options for logistics chains of cargo delivery is carried out on the basis of their alternative options, which largely determines the efficiency of cargo transportation.*

*In the logistics chain, which reflects the technological process of cargo delivery, cargo flows, information flows and financial flows circulate. It is the technological process of cargo delivery with all its components that is simulated using the mathematical apparatus of the theory of queuing in the form of a network of queuing systems.*

*The article presents the implementation of a model for analyzing the logistics chain of cargo delivery in the Excel spreadsheet environment in order to find the average number of requirements in the network.*

**Key words:** cargo transportation, logistics chain, mass transit system network, optimization, average number of requirements, international connection.

Дата надходження статті: 11.11.2025

Дата прийняття статті: 02.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025