

*Віктор Мироненко
Надія Алексійчук*

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ СИСТЕМИ КОНТЕЙНЕРНИХ ТЕРМІНАЛІВ

Існуючі методи оцінки пропускної спроможності контейнерних терміналів не дозволяють розрахувати пропускну спроможність усієї системи, що включає декілька терміналів і транспортні зв'язки між ними. У статті розглянуті різні методики розрахунку пропускної спроможності, що ґрунтуються на аналітичних методах, теорії масового обслуговування і мережах Петрі для отримання найбільш відповідних результатів та підвищення пропускної спроможності всієї системи контейнерних терміналів.

Существующие методики оценки пропускной способности контейнерных терминалов не позволяют оценить пропускную способность всей системы, включающей несколько терминалов и соединяющие их транспортные линии. В статье рассмотрены различные методики расчета пропускной способности, основанные на аналитических методах, теории массового обслуживания и сетях Петри для получения наиболее адекватных результатов и повышения пропускной способности всей системы контейнерных терминалов.

Actual methodologies of container terminal capacity estimation do not allow calculating the capacity of a system comprising a number of container terminal and transport links between them. The article discusses different methodologies of capacity calculation based on analytical methods, on queuing theory and Petri networks to obtain the most appropriate results for increasing the overall container terminal system capacity.

Ключові слова: контейнери, контейнерні перевезення, контейнерні поїзди, контейнерні термінали, сортувальна станція, прикордонна станція, пропускна спроможність, система контейнерних терміналів, модель, система масового обслуговування, мережі Петрі.

Постановка проблеми. Перевезення контейнерних вантажів є одним із найважливіших сегментів глобального транспортного ринку. Сьогодні позиція України на ньому не найкраща, адже контейнери так і не стали поки що масовим засобом доставки вантажів у країні. Відкритим залишається питання спроможності системи контейнерних терміналів України переробити та перевезти ті обсяги контейнерів, які формуються сьогодні, а тим більше зростання обсягів перевезень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теорії та практиці функціонування та моделювання транспортних систем присвячені роботи вчених: Бутова А.С., Горєва А.Е., Дмитрієва І.А., А. Крячко К.В., Кулібанова Ю.М., Нечасва Г.І. та ін.

Метою статті є визначення інтегрального показника пропускної спроможності системи контейнерних терміналів (КТ), що створюються на базі інфраструктури залізничного транспорту та розробка методики його розрахунку.

© Мироненко В. К., Алексійчук Н. М., 2012

Матеріали і результати дослідження. Контейнерний термінал – це вантажний термінал, спеціалізований на переробці контейнерних вантажів. Призначення контейнерних терміналів в транспортних мережах (або в логістичних ланцюгах контейнерних перевезень) полягає в перетворенні контейнерних потоків (розмірів транспортних партій, часу їх прибуття та відправлення та ін.) при передачі їх з одного виду транспорту на інший. Мета цього перетворення вантажопотоків полягає в тому, щоб забезпечити найефективніше подальше транспортування вантажів, товарів, матеріалів у контейнерах [1].

Систему контейнерних терміналів на базі залізничного транспорту, як і будь-яку іншу систему, згідно з базовими системними принципами можна ідентифікувати (технічно) як сукупність елементів, пов'язаних між собою визначеними залежностями [2].

Так система S складається з певної кількості елементів a_1 до a_n , параметрів приведених елементів h_1 до h_n , відношень r_1 до r_n між цими елементами і формально може бути представлена як:

- Сукупність елементів, $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$.
- Параметри елементів, $H = (h_1, h_2, \dots, h_n)$.
- Залежності між елементами (відношення), $R = (r_1, r_2, \dots, r_n)$.
- Система КТ, $S = (A, H, R)$.

Метою формалізації системи КТ загалом є досягнення рівномірного в часі і просторі потоку контейнерів між елементами системи з максимально можливою швидкістю проходження ланок. Водночас формалізація системи вимагає врахування її зв'язків з навколишнім середовищем. Систему КТ можна подати як:

$$S = (A, H, R, R^*),$$

де R^* – сукупність залежностей елементів системи A з елементами оточення A' . Це можна зобразити наведеною нижче схемою, на якій показано приклад системних зв'язків між елементами системи A : контейнерним терміналом, найближчою сортувальною станцією, що його обслуговує, які є елементами більшої системи КТ (обслуговує потоки контейнерів між конкретними морськими портами та/або прикордонними станціями сухопутних переходів). До елементів оточення A' можна віднести вантажні термінали, автомобільний транспорт, вантажовідправників і т.д.

Названі елементи слід розуміти у загальноприйнятому значенні. Так, сортувальна станція – це станція, призначена для масового розформовування та формування вантажних поїздів, виконання вантажних, комерційних та технічних операцій [3]. Прикордонна станція – станція, що розташована перед кордоном із суміжною державою. Наступною за цією станцією є станція суміжної держави [4].

Наявність в системі КТ таких елементів як контейнерний термінал, сортувальна станція, морський порт і прикордонна станція, передбачає складний характер взаємодії приведених елементів. Підсистемами можна вважати як взаємодію безпосередньо контейнерного терміналу із сортувальною станцією, з морським портом (динамічні системи), так і кожен елемент, наприклад, контейнерний термінал, сортувальна станція (статичні системи).

Спрощену формалізовану модель системи КТ можна подати як

$$S = (K, B, L, J, Z, W, R),$$

де K – обсяг контейнерів, що знаходяться в системі; B – матеріальна база системи; L – працівники, задіяні в системі КТ; J – інформаційно-обчислювальні системи управління перевізними процесами та системи управління транспортними потоками; Z – операції, що відбуваються з контейнерами; W – моменти часу початку та завершення операцій з контейнерами щодо досягнення цілей функціонування; R – сукупність залежностей між елементами та підсистемами.

У свою чергу, матеріальна база $B = (I, T, N)$,

де I – інфраструктура транспорту загального користування; T – транспортні та інші комунікації контейнерного терміналу; N – техніка транспорту, що включає в себе транспортні засоби і навантажно-розвантажувальні системи.

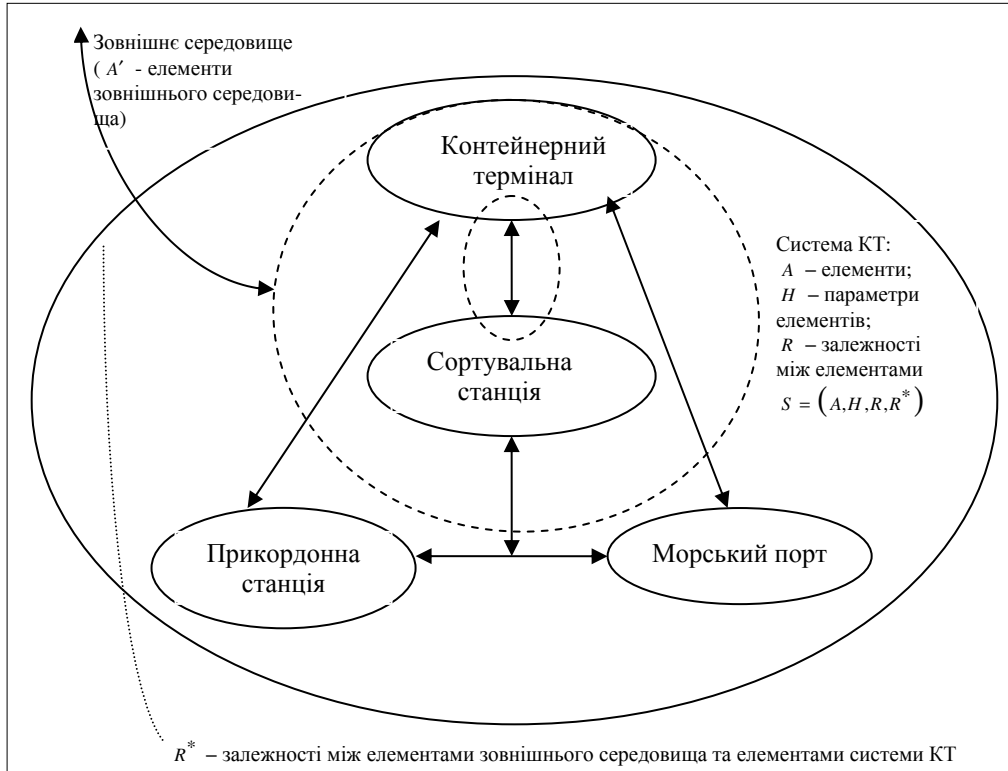


Рис. 1. Схематична інтерпретація моделі системи КТ $S = (A, H, R, R^*)$

Аналогічно можуть бути представлені інші підсистеми.

Стосовно поданого варіанта моделі системи КТ доцільно обмежитись розглядом таких видів залежностей:

- R_1 – залежності між елементами K і B ;
- R_2 – залежності між елементами K і L ;
- ...;
- R_w – залежність між елементами Z і W .

Подані залежності характеризуються як двосторонні. Водночас загальний підхід вимагав би ідентифікації і врахування m -сторонніх залежностей, наприклад K , B і L . У базовому варіанті систему КТ можна подати так, як зображено на рис. 2.

Приведена модель системи КТ повністю залежить від обраних принципів та процедури її структурування на підсистеми (складові елементи). Для забезпечення рівномірного потоку контейнерів з можливо найвищою швидкістю проходження ланок необхідно визначити спроможність системи КТ забезпечити перевезення наявних контейнерів.

На пропускну спроможність системи КТ ($ТС_{КТ}$) безпосередньо впливає переробна спроможність причалів в портах, пропускну спроможність на митних кордонах, стан транспортної інфраструктури, яка забезпечує контейнерні перевезення (залізниці, автошляхи, контейнерні термінали). Саме ці елементи виступатимуть як складові частини пропускну спроможності:

$$TC_{KT} = f\{Pc_{KT}, Pc_{МП}, Pc_{ПС}, Pc_{инфр}\},$$

де Pc_{KT} – переробна спроможність контейнерного терміналу;

$Pc_{МП}$ – переробна спроможність морського порту;

$Pc_{ПС}$ – пропускна спроможність прикордонних станцій;

$Pc_{инфр}$ – пропускна спроможність транспортної інфраструктури.

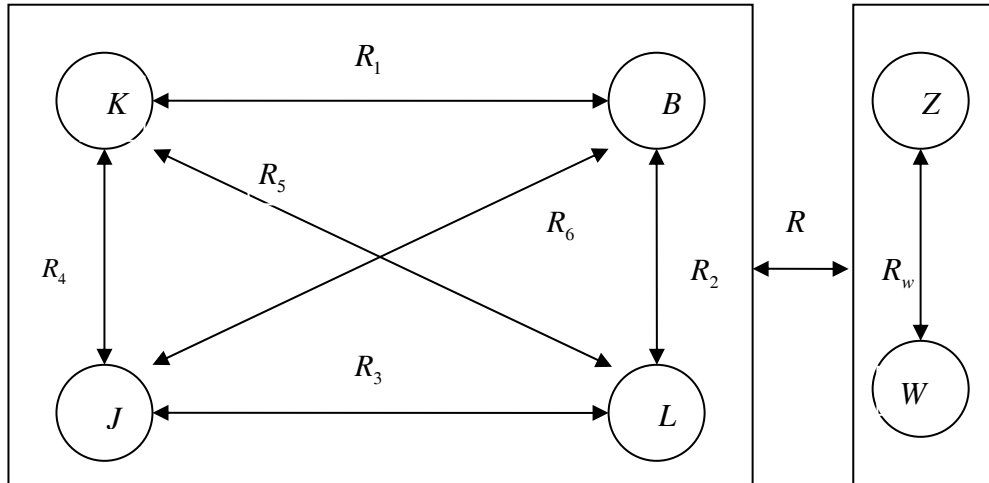


Рис. 2. Основні елементи і залежності системи КТ $S = f(A, R)$

Джерело [2]

Пошук «вузьких місць» у системі є важливим аспектом при визначенні пропускної спроможності системи. Пропускна спроможність системи КТ буде рівна мінімальній з пропускних спроможностей складових елементів. Під час аналізу велике значення має балансування потоків у системі КТ, тобто знаходження такої кількості контейнерів у вузлах (елементах), при якому середній час перебування в системі є мінімальним, або її пропускна здатність максимальна.

Під пропускну спроможністю транспортної інфраструктури мають на увазі розрахункову спроможність ліній залізниці, що задіяні в перевезеннях, за формулою [5]:

$$Pc_{инфр} = \frac{(1440 - t_{техн}^0) \alpha_m^0}{I_m}, \text{ поїздів/добу,} \quad (1)$$

де $t_{техн}^0$ – тривалість технологічних перерв (для ремонту основного шляху), хв.;

α_m^0 – коефіцієнт, який враховує вплив відмов у роботі технічних засобів, $\alpha_m^0 \leq 1$;

I_m – величина міжпоїздного інтервалу, хв.

Пропускна спроможність може розраховуватися різними методами. Наприклад, якщо тривалість обслуговування однієї транспортної одиниці описується нормальним законом розподілу, а розрахунковий період часу, який використовується для обслуговування транспортних одиниць – детермінована величина, то практична пропускна спроможність ділянки визначається за формулою:

$$n = \bar{n}_p - t_\beta \sigma_n, \text{ поїздів /добу,} \quad (2)$$

де t_β – чисельне значення стандартизованого відхилення інтегральної функції нормального розподілу;

σ_n – середньоквадратичне відхилення пропускної спроможності ділянки, поїздів/добу.

Пропускна спроможність прикордонних станцій принципово не відрізняється від сортувальної станції, але необхідно враховувати момент прийому/здачі вагонів за кордон, з урахуванням пов'язаних з цим контрольних процедур та можливостей прикордонної станції суміжної держави.

Контейнерні термінали в основному займаються переробкою вантажів (контейнерних вантажів), формуванням вантажних партій для відправки, відправкою вантажу під завантаження на інший вид транспорту, наданням експедиторських, митно-брокерських, фінансових послуг та страхування. Метою їх функціонування є надання послуг з прийому, зберігання, митного оформлення, формування вантажу для відправки, перевантаження та відправки вантажу з одного транспорту на інший для подальшого перевезення до пункту призначення.

Переробну спроможність контейнерних терміналів можна визначити по обробці вагонів з контейнерами як сумарну переробну здатність по його районах, окремих вантажних фронтах (ВФ) з урахуванням особливостей технологій їх роботи. В загальному вигляді переробна спроможність ВФ, які працюють за добовим циклом, визначається як [6]:

$$Pc_{KT} = \frac{E_{скл} + N_a^{\partial}}{q_e \left[1 - \frac{T_{приб}}{T_3} (1 + \varphi) \right] \mu} + \frac{N_a^{\eta}}{q_e}, \text{ вагонів/добу} \quad (3)$$

де $E_{скл}$ – експлуатаційна місткість складу, контейнерів (з урахуванням ярусності штабелювання контейнерів);

N_a^{∂} , N_a^{η} – кількість вантажу, яка зберігається, відповідно в денну і нічну зміну на автомобільному рухомому складі, контейнерів;

q_e – статичне навантаження на вагон, конт./ваг;

$T_{приб}$ – тривалість прибирання (вивезення) вантажу на склад протягом доби, год;

T_3 – тривалість надходження (завезення) вантажу на склад протягом доби, год;

φ – коефіцієнт безпосереднього перевантаження вантажів з рухомого складу одного виду транспорту на інший;

μ – коефіцієнт наявності оперативної вільної ємності, необхідної для раціональної роботи навантажувально-розвантажувальних машин і додержання спеціалізації складської площі (для контейнерних майданчиків з двоюрисним штабелюванням контейнерів – 1,15).

Аналогічно визначається пропускна спроможність морського порту, де в основному виконується перевантаження вантажу з наземного виду транспорту на судно та формування вантажних суднових партій для подальшого перевезення, або ці самі операції в зворотному порядку.

Розрахунки, подібні представленим формулами (1 – 3), можна узагальнено визначити як аналітичний підхід до визначення пропускної спроможності окремих елементів системи КТ, який дає можливість оцінити та порівняти їх, визначити «вузькі місця» системи. Однак такий підхід не дає змоги описати (моделювати) функціонування системи в цілому або в її обмежених рамках. Тут в нагоді можуть стати інші підходи і методи.

Для визначення пропускної спроможності розглянемо систему КТ як систему масового обслуговування (СМО).

Як відомо [7, 8], ключовою характеристикою будь-якої СМО, є коефіцієнт завантаження каналу (обслуговує пристрої, апарат) ρ . Вже сама його величина говорить про достатність (або недостатність) каналів та інтенсивність обслуговування, та про їх потрібну кількість.

ρ – коефіцієнт завантаження системи або середня кількість каналів, які необхідно мати, щоб обслуговувати за одиницю часу всі вимоги, що надходять:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda \cdot T_{обс}, \quad (4)$$

де λ – інтенсивність вхідного потоку заявок (середнє число вимог, що надходять за одиницю часу: за годину, добу і т.п.); μ – інтенсивність обслуговування заявок (середнє число вимог, що задовольняються за одиницю часу: за годину, добу і т.п.); $T_{обс}$ – середній час обслуговування одним каналом однієї вимоги.

Система КТ складається з n обслуговуючих каналів, кожен з яких може одночасно обслуговувати лише одну вимогу. В систему надходить простий (пуасонівський) потік вимог з параметром λ . Якщо в момент надходження чергової вимоги всі n каналів зайняті, то ця вимога ставиться в чергу, при умові що в ній стоїть менше n вимог, інакше – покидає систему. Іншими словами, вимога отримує відмову, якщо в системі знаходиться $s = n + m$ вимог. Час обслуговування кожної вимоги є випадковою величиною, яка підкоряється експоненціальному закону розподілу з параметром μ .

Таблиця 1.1. Технологічний і математичний зміст основних понять та елементів СМО стосовно контейнерного терміналу при взаємодії видів транспорту

Поняття або елемент СМО		Вид транспорту	
		Автомобільний	Залізничний
Вимога		Автомобіль з контейнером (або для вивозу контейнера)	Поїзд
			Маневровий состав
			Група вагонів
			Вагон
Вхідний потік вимог		Потік автомобілів	Маневрові состави для подачі на КТ
			Маневрові состави, що подаються на КТ
			Групи вагонів для різних ВФ
			Вагони під вивантаження, для навантаження
Обслуговування вимог		Перевірка документів та контейнера, зважування, вивантаження або завантаження контейнера	Підбір маневрових составів на КТ
			Подача маневрового состава на КТ
			Розстановка груп вагонів по ВФ
			Вантажні операції з вагонами на ВФ
Канал обслуговування		Працівники КПП, ваги, перевантажувач, кран або т.п. механізм	Маневровий локомотив
			Маневровий локомотив
			Маневровий локомотив
			Перевантажувач, кран або т.п. механізм
Інтенсивність	вхідного потоку вимог, λ	Величина, зворотна середньому інтервалу надходження заявок $I_{ВХЗ}$ Величина, зворотна середньому часу обслуговування $t_{ОБС}$	
	обслуговування заявок, μ		
Коефіцієнт завантаження каналу, ρ (математичний)		$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$	
Коефіцієнт завантаження каналу, ρ (технологічний)		$\rho = \frac{t_{ОБС}}{I_{ВХЗ}}$	

Абсолютна пропускна спроможність системи – це кількість вимог (контейнерів), які система обслуговує за одиницю часу. Відносна пропускна спроможність системи – це відношення кількості вимог, що обслуговуються, до їх загальної кількості, що надійшла в систему. Під вимогою мають на увазі запит на задоволення потреби в перевезенні контейнерів, а обслуговування полягає в її задовільненні.

$$\text{Імовірність відмови в обслуговуванні: } P_{\text{отк}} = \frac{\rho^{n+m}}{n!n^m} P_0 \quad (5)$$

$$\text{Імовірність обслуговування («надійність»): } P_{\text{обс}} = 1 - P_{\text{отк}} \quad (6)$$

$$\text{Абсолютна пропускна здатність: } A = P_{\text{обс}} \lambda \quad (7)$$

Таблиця 1.2. Технологічний та математичний зміст основних понять і елементів СМО стосовно морського порту при взаємодії видів транспорту

Поняття або елемент СМО		Вид транспорту	
		Морський	Залізничний
Вимога	Судно	Поїзд	
		Маневровий состав	
		Група вагонів	
		Вагон	
Вхідний потік вимог	Потік суден	Маневрові состави для подачі на КТ	
		Маневрові состави, що подаються на КТ	
		Групи вагонів для різних ВФ	
		Вагони під вивантаження, для навантаження	
Обслуговування вимог	Швартування, вантажні та інші операції, відшвартування	Підбір маневрових составів на КТ	
		Подача маневрового состава на КТ	
		Розстановка груп вагонів по ВФ	
		Вантажні операції з вагонами на ВФ	
Канал обслуговування	Буксир, причал, контейнерний перевантажувач або т.п. механізм	Маневровий локомотив	
		Маневровий локомотив	
		Маневровий локомотив	
		Перевантажувач, кран або т.п. механізм	
Інтенсивність	вхідного потоку вимог, λ	Величина, зворотна середньому інтервалу надходження заявок $I_{ВХЗ}$	
	обслуговування заявок, μ	Величина, зворотна середньому часу обслуговування $t_{ОБС}$	
Коефіцієнт завантаження каналу, ρ (математичний)		$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$	
Коефіцієнт завантаження каналу, ρ (технологічний)		$\rho = \frac{t_{ОБС}}{I_{ВХЗ}}$	

Можливий й інший підхід – з використанням мереж Петрі. Розглянемо приклад побудови мережі Петрі [9, 10, 11] для системи КТ, в якій переміщуються контейнери (рис.3).

З напрямків M (припортова станція Іллічівськ), K (станція, на якій розташований контейнерний термінал Київ-Ліски), ..., MK_n (інші припортові станції та станції, на яких розташовані контейнерні термінали, наприклад: Іллічівськ-Поромна, Одеса-Порт, Одеса-Ліски, Донецьк-Ліски, Луганськ-Ліски, Харків-Ліски, Дніпропетровськ-Ліски; станції, на яких навантажуються контейнери, наприклад: Нікополь, Запоріжжя-Ліве та ін.) нерівномірно прибувають контейнери на платформах, групи платформ з контейнерами, контейнерні поїзди на сортувальну станцію Козятин (СС). Напрямок MK_i , де $i = 1 \dots n$ змодельовано за допомогою позиції P_{MK_i} k_i рівня, де $i = 1 \dots n$ з фіксованим

часом затримання фішок (контейнерів, груп контейнерів, контейнерних поїздів) [12]. В позиції P_{MK_i} j -та заявка (контейнер, група контейнерів, контейнерний поїзд) затримується з фіксованим часом f_{i_j} для $j=1\dots k_i$, де $i=1\dots n$ (з напрямку MK_i на CC нерівномірно прибуває k_i контейнерів, груп контейнерів, контейнерних поїздів, де $i=1\dots n$).

Предикатний перехід $t_{1_n}^{\langle MK_{n_k}, CC_j \rangle}$ моделює прибуття контейнерів з k -го рівня позиції k_i -го рівня P_{MK_n} , з якого вилучається k_{1_n} фішок (контейнерів), де k_{1_n} – вага вхідної дуги переходу, на j -й рівень предикатної позиції m -го рівня P_{CC} , на який добавляється k_{2_n} фішок (контейнерів), де k_{2_n} – вага вихідної дуги переходу.

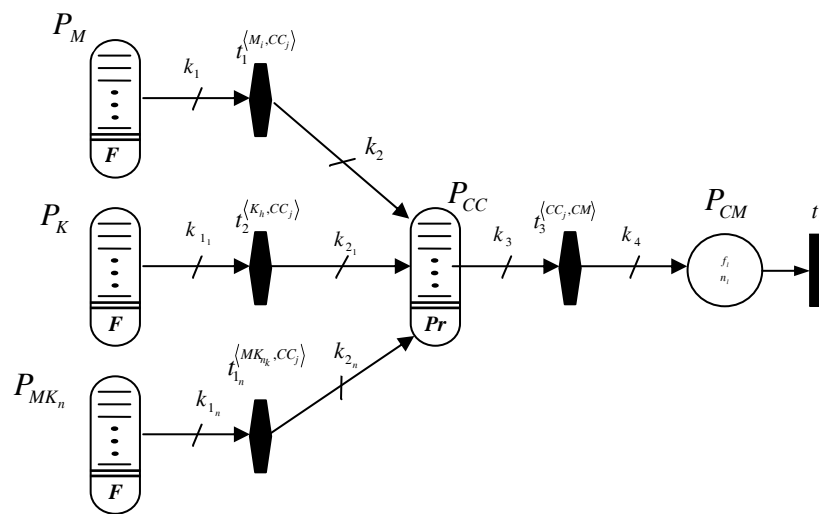


Рис. 3. Підсистема формування контейнерних поїздів у системі КТ

Позиція P_{CC} моделює CC . Предикатна позиція P_{CC} m -го рівня, де $m = \sum m_i$ моделює послідовність обслуговування заявок (обробка перевізних документів, відчеплення платформ з контейнерами та накопичення їх для формування групи вагонів для подальшого відправлення розробленим графіком на станцію, де буде проводитись митний огляд, наприклад, на станцію Коростень). Позицію P_{CC} будемо називати генератором з напрямків MK_i , де $i=1\dots n$, який регулює обслуговування заявок. На сортувальній станції здійснюється об'єднання основного складу поїзда, який сформований станціями Одеського регіону та групи вагонів з контейнерами, завантаження яких провадилось станціями Донецьк-Ліски, Луганськ-Ліски, Харків-Ліски, Дніпропетровськ-Ліски з контейнерними терміналами.

Вихідний предикатний перехід $t_3^{\langle CC_j, CM \rangle}$ задається предикатом $\langle CC_j, CM \rangle$: перший параметр CC_j вказує на j -й рівень позиції m -го рівня P_{CC} , з якого вилучається k_3 фішок (контейнерів), де k_3 – вага вхідної дуги переходу; другий параметр CM формально вказує на позицію P_{CM} , в яку добавляється k_4 фішок (контейнерів), де k_4 – вага вихідної дуги переходу.

Позиція P_{CM} моделює станцію, де проводиться митний огляд (станція Коростень). В позиції P_{CM} заявки затримуються з фіксованим часом f_2 (середній час митного огляду). Перехід t_4 моделює відправлення контейнерного поїзда за кордон.

Приведена мережа Петрі є обмеженою, оскільки всі позиції вузлів є обмеженими. Обмеженість досліджує виконання умови, що кількість «фішок» (контейнерів) в позиції не перевищує заданого числа (пропускна здатність елемента системи КТ) [11]. Пропускна спроможність системи КТ – це кількість контейнерних поїздів, яку може пропустити через себе система за одиницю часу. Контейнерні поїзди повинні мати свої нитки графіка і курсувати у визначений час, тоді це буде цікаво для вантажовідправника. Чіткий термін доставки є немаловажним фактором при виборі виду транспорту вантажовідправниками.

Висновки. Даний підхід до розрахунку інтегрального показника пропускної спроможності системи КТ дозволить визначити, які обсягів контейнерів можуть бути перевезені залізницями через контейнерні термінали в умовах взаємодії всіх видів транспорту, задіяних в перевезенні, що в свою чергу допоможе з визначенням «вузьких місць» та першочергових заходів з їх ліквідації. Це в цілому сприятиме розвитку контейнерних перевезень в Україні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Н. П. Журавлев, О. Б. Маликов. Транспортно-грузовые системы: учебник для вузов ж.-д. транспорта. – М.: Маршрут, 2006. – 368 с.
2. Крикавський С. В., Чернописька Н. В. Логістичні системи: навч. посібник. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2009. – 264 с.
3. Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте: учебник для вузов/ Под ред. П.С. Грунтова. – М.: Транспорт, 2002. – 543 с.
4. Правила технічної експлуатації залізниць України, затверджені наказом Міністерством транспорту України №411 від 20 грудня 1996 року, зареєстровані в Міністерстві юстиції України 25 лютого 1997 р. за № 50/1854.
5. Методичні вказівки до самостійної роботи і практичних завдань з дисципліни «Взаємодія видів транспорту» (для студентів напряму підготовки 6.070101 «Транспортні технології») / Укл.: Бурко Д. Л., Прасоленко О. В. – Харків: ХНАМГ, 2009. – С. 36.
6. Інструкція з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць України: Навч.-метод. посіб./ Розробники О. Ф. Вергун та ін. – К.: Транспорт України, 2002. – 376 с.: іл.
7. Дослідження операцій. Практичний курс: навч. посіб. / В. Є. Березовський, М.М. Гузій, В. М. Дякон, Л. Є. Ковальов, М. О. Медведєва – Умань: Видавець «Сочінський», 2011. – 238 с.
8. Ржевський С. В., Александрова В. М. Дослідження операцій: Підручник. – К.: Академвидав, 2006. – 560 с. (Альма-матер).
9. Смехов А. А. Введение в логистику. – М.: Транспорт, 1993. – 112 с.
10. Котов В. Е. Сети Петри. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 160 с.
11. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 264 с., ил.
12. Селецький В. С. Застосування математичного апарату мереж Петрі на залізничному транспорті // Залізничний транспорт України. – 2009. – № 2. – С. 3 – 6.