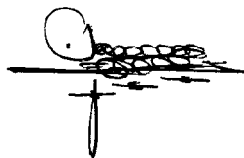


УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО  
ТРАНСПОРТУ

Луханін Микола Іванович



УДК: 656.222.3

**МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ  
КОРИДОРІВ НА БАЗІ ПОШИРЕНИХ МЕРЕЖ ПЕТРІ**

05.22.20 - Експлуатація та ремонт засобів транспорту

А в т о р е ф е р а т

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків-2003

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Українській державній академії залізничного транспорту (УкрДАЗТ) Міністерства транспорту України, м.Харків.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор **Загарій Геннадій Іванович**, Українська державна академія залізничного транспорту Міністерства транспорту України, завідувач кафедри "Автоматика і комп'ютерні системи управління".

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор, **Буцько Тетяна Василівна**, Українська державна академія залізничного транспорту Міністерства транспорту України, завідувач кафедри "Управління експлуатаційною роботою та міжнародними перевезеннями";

кандидат технічних наук, доцент, **Бобровський Володимир Ілліч**, Дніпропетровський національний технічний університет залізничного транспорту Міністерства транспорту України, доцент кафедри "Управління процесами перевезень".

**Провідна установа:** Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, кафедра "Залізничний транспорт", Міністерство освіти і науки України, м. Луганськ.

Захист відбудеться "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 200 р. о \_\_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.04 при Українській державній академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейербаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Української державної академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейербаха, 7.

Автореферат розісланий "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 200 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,

доктор технічних наук

\_\_\_\_\_ А.Б.Бабанін

---

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Вступ.** У сучасних умовах процес перевезень (ПП) на залізницях України (ЗУ) є складним логіко-динамічним об'єктом.

Керування перевезеннями вимагає маршрутизації потоків вантажів, удосконалення експлуатації ЗУ, раціональної організації залізничних транспортних коридорів (ТК), а значить - скоординованої роботи всіх підприємств і ділянок. Ці задачі повинні вирішуватися на основі прогнозування спланованого раціональним чином ПП. Ефективним засобом вирішення цих задач є побудова математичних моделей ПП у поєднанні з використанням нових інформаційних технологій, бо існуючі технології не відображають: просторової розподіленості ПП; експлуатаційних особливостей ЗУ; комп'ютерного представлення цих процесів у динаміці.

**Актуальність теми.** Значне місце у системі перевезень на ЗУ займають ТК, які створюються на основі рішення країн Європейської співдружності про розвиток і розширення мережі міжнародних ТК (з виходом на Балтійське і Чорне моря, а також на країни Азії і Кавказу).

На період 1998 – 2005 рр. прийнята Постанова Кабінету Міністрів України №346 від 20.03.98 р. "Про затвердження програми створення і функціонування національної мережі міжнародних транспортних коридорів в Україні". Через Україну повинні проходити три "критських коридори" і три коридори Європейської співдружності.

Створення ТК, крім рішення технологічних задач реалізації відповідної будівлі шляху і підтримки підвищених швидкостей руху поїздів, вимагає удосконалення технології роботи при обслуговуванні поїздів. Отже, перед ЗУ стоїть задача удосконалення ПП із максимальним задоволенням вимог клієнтів щодо перевезень пасажирів і вантажів з урахуванням нових ринкових економічних умов. Нова інформаційна технологія, що розроблена у дисертації, сприяє здійсненню цього.

Роботи зі створення і дослідження моделей ПП ведуться з кінця 60-х років минулого сторіччя. Суттєвий внесок в розробку різних методів моделювання зробили вчені: Бутько Т.В., Бусленко Н.П., Бобровський В.І., Глушков В.М., Грунтов П.С., Єфіменко Ю.І., Жуковицький І.В., Маміконов А.Г., Михалевич В.С., Нагорний Є.В., Негрей В.Я., Пітерсон Дж., Цвиркун А.Д., Шафіт Є.М. та ін. За цей час вчені створили різні моделі, але ці моделі зорієнтовані на вирішення окремих задач перевезень,

побудовані на різних методах і не націлені на вирішення задачі дослідження перевезень по ТК.

Таким чином, з огляду на вище викладене, а також на те, що в Україні відсутня статистична інформація, що характеризує ПП по ТК, для підвищення ефективності експлуатації ЗУ **актуальною** є задача удосконалення перевезень, яка може бути вирішена лише на основі використання сучасних інформаційних технологій, моделювання перевезень і їхнього прогнозування.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі АКСУ УкрДАЗТ у рамках прийнятих комплексних цільових програм і концепцій: Реструктуризації залізничного транспорту України (затверджена Міністерством транспорту України 18.06.1997 р., протокол №14); Підвищення безпеки руху на залізницях України в 1997 – 2001 рр. (Постанова Кабінету Міністрів України від 22.04.1997 р. №367); Створення і функціонування національної мережі транспортних коридорів України (Постанова Кабінету Міністрів України від 04.08.1997 р. №821), а також у відповідності до НДР, що виконувалися на кафедрі: "Оптимізація алгоритмів управління агрегатами" (№ 0100U000821- 00); "Розробка технічної структури підсистеми автоматичного знімання інформації" (№ NDP0103U000760).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертації є моделювання залізничних транспортних коридорів на базі поширених мереж Петрі, яке адекватно відбиває ПП на залізничних ТК, при скороченні часу моделювання та витрат обчислювального ресурсу.

Відповідно до поставленої мети були сформульовані такі **задачі**:

- Виконати аналіз стану ПП на ЗУ на підставі використання вітчизняного і закордонного досвіду.
- Розробити технологічну мову моделювання ТК на основі аналізу теорії і практики застосування математичного апарату мереж Петрі.
- Формалізувати описання моделей ТК на основі узагальнених мереж Петрі шляхом їх поширення, що дозволяє моделювати ТК на залізницях при скороченні витрат часу і зменшенні обчислювального ресурсу.
- Виконати моделювання і верифікацію перевезень по ТК України на основі поширених мереж Петрі з метою прогнозування і прийняття ефективних управлінських рішень для удосконалення технології роботи ЗУ та раціональної організації вагонопотоків.
- Провести комп'ютерне моделювання ТК з використанням отриманих нових теоретичних результатів, яке потребує участі тільки кінцевого користувача - технолога

(без програмістів).

*Об'єкт дослідження* – процес перевезень на залізницях України.

*Предмет дослідження* – моделі процесу перевезень, виконані на основі використання географічного опису залізниць України.

*Метод дослідження* – теорія графів, математичний апарат дводольних мереж Петрі, поширений автором для моделювання процесу перевезень по залізничних транспортних коридорах з урахуванням його технологічних особливостей і динаміки.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у тому, що:

- Удосконалено технологію моделювання експлуатаційних характеристик ПП на основі використання узагальненого класу математичного апарату мереж Петрі, який поширено для реалізації особливостей ТК на ЗУ. Вперше: для моделювання затримок часу розроблено структурну модель обслуговування; деяким дугам надано властивість конвексності; всім стримуючим дугам надано властивість мати вагу  $\geq 1$ .
- Вперше розроблено технологічну мову моделювання ТК на основі поширення мереж Петрі, що дозволило враховувати близький до географічного принцип описання ЗУ, існуючі та перспективні ПП на залізницях. При цьому збільшуються відображуючі можливості моделювання як у статичному описі, так і у динаміці із завданням потрібної кількості тактів роботи моделі.
- Доопрацьовано списковий метод введення інформації, зрозумілий технологам, бо він використовує описання мережі Петрі у трьох термінах: "звідки" (позиція чи перехід), "куди" (перехід чи позиція), "з вагою" (нульовою або цілочисельною зі знаком плюс чи мінус).
- Запропоновано критерій оптимізації, що забезпечує скорочення витрат часу і ресурсів на здійснення моделювання.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що вони представляють наукові, методичні та прикладні основи для побудови якісно нової методології моделювання ПП на ЗУ.

Розробка нової техонлогічної мови моделювання на основі поширення МП, введеного автором, дає змогу значно зменшити обсяг даних, необхідних для опису технологічних процесів, спростити процедуру введення інформації, необхідної для моделювання, скоротити час моделювання та відобразити процеси у динаміці.

Використання результатів дисертації особливо важливе при моделюванні складних ситуацій, які виникають у ПП.

Розроблені в дисертації наукові положення і результати використані при створенні

автоматизованої інформаційно-довідкової системи про стан ПП по ТК та інших ділянках ЗУ: в інформаційно-довідковій підсистемі на Одеській залізниці (акт впровадження від 07.11.2002 р.); в динамічній моделі підсистеми контролю і прогнозування ПП на Південно-Західній залізниці (акт впровадження від 20.12.2002 р.); в навчальному процесі УкрДАЗТ при курсовому і дипломному проектуванні.

**Особистий внесок автора.** Усі положення і результати, що виносяться на захист, зроблені автором самостійно. В наукових працях, які опубліковані автором у співавторстві, йому належать: формулювання задачі дослідження локальних обчислювальних мереж (ЛОМ) як складової частини системи управління ПП [2]; розробка вимог до моделі системи [3]; використання методу декомпозиції для побудови графивої моделі [4]; узагальнення математичного апарату мереж Петрі з метою обґрунтування напрямків їх поширення [5]; розробка структури ТК та математичний опис моделі [6]; основи використання розробленої в інших роботах методики для моделювання технологічних процесів [7]; формулювання задачі подальшого удосконалення моделей з використанням сучасних інформаційних технологій [8].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації доповідалися й одержали схвалення на: 13 - 15-й міжнародних школах-семінарах "Перспективні системи керування на залізничному, промисловому і міському транспорті" (м. Алушта, 2000 - 2002 рр.); 63-й і 64-й міжнародних науково-технічних конференціях кафедр Української державної академії залізничного транспорту і фахівців залізничного транспорту (м. Харків, 2001 р., 2002 р.); 2-й міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми інформатики і моделювання" (м. Харків, 2002 р.); розширених засіданнях кафедри АКСУ УкрДАЗТ.

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано вісім статей у наукових виданнях, затверджених ВАК України.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел (112 найменувань) і 4 додатків. Робота містить 112 сторінок основного тексту, 31 рисунок, 55 таблиць, додатки на 11 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У введенні обґрунтована актуальність теми, формулюються мета, задачі дослідження, наукова новизна і практичне значення отриманих результатів. Відбито основні наукові положення і результати досліджень, що виносяться на захист. Наведено інформацію про структуру дисертації, публікації і апробацію роботи.

У першому розділі представлені матеріали по аналізу ПП на залізничному транспорті Західної Європи, США, Японії і Росії.

Відзначається, що після тривалого періоду зниження обсягів вантажних перевезень в Україні в 2002-2003 рр. почався ріст обсягів перевезень вантажів і прискорилися роботи з розвитку мережі ТК.

Розглянуто питання реструктуризації і використання нових технологій ЗУ. Ключову роль у цьому будуть грати нові технології в області зв'язку, інформатики і моделювання.

Поточний період часу, що відповідає реформуванню економіки України і включенню її в систему міжнародних зв'язків, ставить перед ЗУ складніші задачі задоволення зростаючих вимог до якості й ефективності залізничних перевезень.

Удосконалення ПП на ЗУ являє собою комплексну задачу, для вирішення якої важливе місце мають *створення технологічної мови і методу моделювання перевезень*. Ці задачі наведено у табл. 1.

Для рішення задач моделювання запропоновано використовувати математичний апарат узагальнених мереж Петрі, що дозволяє, з одного боку, здійснити декомпозицію, а з іншого - врахувати і відбити динамічний характер ПП із найважливішими його параметрами (витрата ресурсів, часу, характеристики вантажів).

Проведений аналіз задач моделювання показав, що найбільш істотними при одночасній реалізації ряду моделей є параметри:  $t_s$  – відбиваючий астрономічний час перебування окремої моделі в системі;  $t_c$  – визначальний сумарний час, витрачений центральними процесорами вузлів локальних обчислювальних мереж (ЛОМ) на виконання окремої моделі;  $V_\ell$  – визначальний сумарний обсяг зовнішньої пам'яті вузлів ЛОМ, потрібний для окремої моделі;  $V_i$  – визначальні сумарні обсяги задіяної оперативної пам'яті;  $K_c$  – визначальна сумарна пропускна здатність задіяних при виконанні кожної окремої моделі каналів ЛОМ;  $t_p$  – визначальний сумарний час обробки транзакцій активної моделі.

Отже, узагальнений показник часу моделювання  $T$  можна визначити за допомогою функціоналу  $J_B = f_B(t_s, t_c, V_\ell, V_i, K_c, t_p)$ ,

де  $f_B$  – багатопараметрична функція, що визначає значення функціонала на

основі вагових коефіцієнтів параметрів з урахуванням рангу кожного з них.

Таблиця 1

Мета і задачі удосконалення перевезень на ЗУ				
Мета	Задачі, що підлягають рішенню	Шляхи реалізації	Технічне і програмне забезпечення	Очікувані результати
Підвищення якості перевезень вантажів і пасажирів	Розробка технічних вимог до моделювання перевезень по ТК України	Створення інформаційно-керуючої системи ІУС УЗ	Сучасні засоби обчислювальної і телекомунікаційної техніки, включаючи ЛОМ	Простота моделювання з відображенням динаміки ПП
Спрощення доступу до користування послугами ЗУ	Забезпечення учасників процесу перевезень необхідною інформацією	<i>Розробка мови моделювання ТК</i>	<i>Програмне забезпечення мови і методу моделювання ПП по ТК України</i>	Скорочення часу моделювання
Підвищення швидкості і безпеки перевезень	Удосконалення телекомунікаційного середовища для передачі інформації	<i>Створення технології моделювання ТК на ЗУ</i>		Можливість прогнозування

Аналіз характеристик вузлів ЛОМ, а також наявність можливості розширення оперативної і зовнішньої пам'яті практично для всіх задіяних вузлів ЛОМ показав, що параметри  $V_{\ell}$  і  $V_i$  не вносять істотних обмежень на час виконання моделі.

Тому можна припустити, що для  $T$  існує кількісна оцінка, що обчислюється для конкретної архітектури ЛОМ. У цьому випадку багатопараметрична функція  $f_{\beta}$  може бути представлена лінійною комбінацією змінних  $T_{ij}$

$$f_{\beta} = \sum_{j \in \bigcup_j Q_j^{(0)}} \sum_{i \in L_r(\tilde{Q})} \alpha_j \cdot \lambda_j^{(i)} \cdot T_{ij},$$

де  $\alpha_j$  – ваговий коефіцієнт розглянутого параметра з множини  $\bigcup_j Q_j^{(0)}$ ;

$\lambda_j^{(i)}$  – коефіцієнт, що враховує інтенсивність інформаційних потоків групи моделей з  $\tilde{Q}$ , визначених розбивкою  $L_r$  на даній множині, що впливають на розмір



відповідного параметра з  $\bigcup_j Q_j^{(0)}$ .

У висновку поставлено задачу досліджень, основною метою якої є розробка технологічної мови моделювання ПП на основі поширених МП.

**В другому розділі** теоретично обґрунтовано побудову нової технологічної мови моделювання на основі узагальнених поширених МП, що дає можливість ефективно моделювати ПП. Проаналізовано семіотику МП, що включає: *прагматику, синтактику* і *семантику*. *Прагматичні елементи* МП включають:

1. *Множину позицій*  $\{I\}$ . Функціонально вона являє собою універсальну цілочисельну пам'ять, характерну для дискретних перетворювачів інформації. 2. *Множину переходів*  $\{J\}$ , що можуть бути лише *закритими* чи *відкритими*. За допомогою переходів забезпечується перетворення інформації. Позиція і перехід у сукупності являють собою гнучкий перетворювач інформації. 3. *Мітки*  $\{m_i\}$ . Вони моделюють *ресурс* конкретної моделі. У дисертації розглядаються однорідні мережі, у яких мітки (одиничні ресурси) зберігають свою розмірність. 4. *Дуги*  $k_{ij}, k_{ji}$ , що з'єднують на графі відповідно позицію з переходом та навпаки і забезпечують передачу міток від позицій до переходів і від переходів до позицій.

Перелічена сукупність елементів графа при наявності ресурсів (міток) створює *умови* відкриття переходів шляхом формування різноманітних кінцевих предикатів для керування переходами.

Зазначеним вибором прагматики позиції  $i$  та переходи  $j$  складаються в *орієнтований біграф* – МП, що складається з двох *підмереж* (рис. 1). При цьому граф є МП тільки в тому випадку, якщо відсутні дуги, що з'єднують позицію з позицією і перехід з переходом:  $i \rightarrow i = \emptyset, j \rightarrow j = \emptyset$ . Дана умова є *основним правилом синтактики* при складанні графів МП.

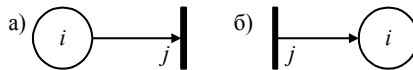


Рис. 1. Підмережі МП а) 1-го роду  $S_1$ , б) 2-го роду  $S_2$

Об'єднання трьох елементів прагматики (*позиції, переходу* і *дуги*) можна розглядати як самостійний прагматичний елемент чи *образ*, що характеризує МП як мову, що, подібно іншим мовам, має властивості комунікабельності й інтелектуальності. МП зручно використовувати при синтезі алгоритмів опису ПП на ПЕОМ.

На рис. 2 показана *елементарна* МП. Прагматика МП може розглядатися у вигляді набору *комплектів*: вхідних позицій  $i$  (1); міток у них  $m$ ; (2); дуг з вагою  $k_{ij}$ , що входять у перехід (3); переходів  $j$  (4); дуг з вагою  $k_{ji}$ , що виходять з переходу (5), і вихідних позицій  $i+1$ , (6).

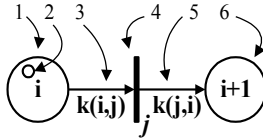


Рис. 2. Елементарна МП і 6 напрямків можливих її поширень

Технічні структури, як правило, вимагають для свого функціонування наявності *ресурсів*. Мова МП надає відповідні описові можливості за допомогою введення в графову структуру  $S$  початкового ресурсу. Цілком визначена МП - це *структура*  $S$  плюс *ресурс*. Відповідний формальний запис (*н'ятірка*) виходить доповненням  $S$  вектором початкової розмітки  $M_{i0}$ :  $\Pi(S) = \{S, M_{i0}\} = \{S_1, S_2, M_{i0}\} = \{I, J, k_{ij}, k_{ji}, M_{i0}\}$ .

Поширеними будемо називати *доповнення* існуючих елементів мови МП новими (спеціальними *дугами* і їх *сполученнями*) з множини 1 – 6 (рис. 2) з метою збільшення образотворчих засобів мови. Наприклад, затримка мітки в часі на будь-яке число кроків моделювання здійснюється структурою, названою "прилад обслуговування".

Найбільшу гнучкість в названих структурах мають класи *узгаальнених* мереж, у яких позиції, переходи і мітки приймають тільки цілі значення.

Запропоновані в дисертації поширення МП представлені в табл. 2. Використано нові типи дуг, старі типи одержали нову інтерпретацію, усі дуги придбали формальний параметр – вагу. Так, вхідні дуги, що споживають ресурс (мітки), інтерпретуються як *транспортні* з вагою  $^+k_{ij}$ . *Інгібіторні* (стримуючі) дуги, що рідко раніше вживалися на практиці через призначувану їм стали вагу тільки (-1), замінені стримуючими дугами із *змінною* вагою  $^-k_{ij}$ . Нарешті, для застосування в умовах залізниць був розроблений *конвеєрний ланцюг* з довільною вагою, що кодується *парою* дуг  $^0k_{ij}$  (на вході в  $j$ ) і  $^0k_{ji}$  (на виході з  $j$ ), і є корисним для моделювання передачі документації про вантаж, що транспортується.

Таким чином, введено два істотних поширення мови МП: стримуючі дуги з вагою ( $^-k_{ij}$ ) і керований конвеєрний ланцюг ( $^0k_{ij} \rightarrow \rightarrow \rightarrow ^0k_{ji}$ ).

Поширена в такий спосіб МП і реалізуюча її програма дозволяють: 1.

Здійснювати оперативне введення в ПЕОМ графа Петрі; 2. Ощадливо моделювати логіку ПП на рівні вузлів перетворення інформації; 3. Враховувати специфіку роботи залізниць.

Таблиця 2

## Поширена мова узагальнених МП

Елемент графа Петрі	Графічне зображення на графі	Примітка
Позиція (і)		$i$ – наскрізний номер позицій $i = \{1, 2, \dots, n\}$
Перехід (j)		$j$ – наскрізний номер переходу $j = \{1, 2, \dots, m\}$ . Перехід може бути відкритий наявністю ресурсу або закритий
Мітки ( $m_i^t$ )		$m_i^t$ – кількість міток у позиції $i$ на $t$ -такті моделювання ( $t = 0, 1, 2, \dots, T$ )
Вхідні в перехід $j$ дуги: а) транспортні з вагою; б) стримуючі з вагою; в) конвеєрні з вагою	(а) (б) (в)	$^+k_{ij}$ – вага дуги з $i$ позиції в $j$ перехід; $^-k_{ij}$ – вага стримуючої дуги з $i$ позиції в $j$ перехід; $^0k_{ij}$ – з позиції ідуть усі мітки $m_i^t$ , якщо перехід відкритий
Вихідні з переходу $j$ дуги: а) транспортні з призначуваною вагою; б) конвеєрні з будь-якою вагою	(а) (б)	$^+k_{ji}$ – вага дуги з переходу $j$ у позицію $i$ ; $^0k_{ji}$ – конвеєрний перехід передає усі мітки у позицію $i$ з позиції, що передує переходу $j$
Керований конвеєрний ланцюг, що враховує вимоги безпеки		Дуга $^-k_{i+1,j}$ керує відкриттям переходу $j$ та забороняє його відкриття, якщо в позиції $i+1$ є хоча б одна мітка

У більшості публікацій з програмної реалізації алгоритму Петрі рекомендується реалізувати масиви  $M_1, M_2$  у просторі позицій і переходів, тобто  $|M_1| = I * J, |M_2| = J * I$  ( $M_1$  та  $M_2$  описують сукупність дуг, що входять до переходів та виходять з них відповідно). Цей простір постійний для обох масивів, але він є надмірним, тобто займає великий обсяг пам'яті.

Більш економним є перехід до частково фіксованого простору. В дисертації використовується той факт, що в обох матрицях (масивах  $M_1, M_2$ ) використовуються

дуги  $K(M_1)$ ,  $K(M_2)$  відповідно. Так, у найпростішому випадку реалізації програми, тобто вказівці джерела, приймача і ваги кожної дуги формати рядків відповідних двовимірних масивів можуть бути представлені у вигляді  $M_1=\{I, J, k_{ij}\}$ ,  $M_2=\{J, I, k_{ji}\}$  ( $i \in \{1, 2, \dots, I\}$ ,  $j \in \{1, 2, \dots, J\}$ ), при цьому нульові елементи не використовуються.

Таким чином, фіксованими в даному випадку виявилися стовпці (три), а число рядків відповідає числу дуг у кожному з масивів, тобто число рядків кожного з масивів визначається співвідношеннями  $N_1(M_1)=3 \cdot I$ ,  $N_2(M_2)=3 \cdot J$ .

Третій масив  $M_{10}$  має розмірність кількості позицій. Він призначений для розміщення ресурсу у позиціях. Число міток кожної позиції задається розроблювачем. Тобто цей масив являє собою вектор початкового маркування.

Четвертий масив  $M'$  - одномірний. Він призначений для збереження і модифікації списку інформативних позицій. Коли закриті всі переходи моделі (мережа мертва), можна аналізувати отримані результати моделювання. Час моделювання (число тактів) задається користувачем. Тобто цей масив задає послідовність розгляду процесів у МП.

Алгоритм обробки МП на кожному такті складається з 2-х етапів:

1. Аналізу переходів на відкриття. 2. Видачі з відкритих переходів числа міток у кожен позицію у відповідності до ваги дуг.

Проведений аналіз показує можливість ефективного моделювання ТК із застосуванням узагальнених МП.

Розроблено програмну реалізацію МП - Winpet. Ядром програми є вказані вище 4 масиви (два двовірних і два одномірних), які повністю описують граф Петрі.

Основний зміст і обсяг програми Winpet визначається обсягом масивів, що вводяться ( $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_{10}$ ,  $M'$ ). Обробна частина програми складає одиниці кілобайт при реалізації на будь-якій мові програмування. Робоча програма написана на мові Паскаль.

**У розділі третьому** на основі розробленої технологічної мови виконано моделювання ТК.

Поняття ТК визначено як тимчасова реорганізація залізничної транспортної мережі для забезпечення необхідної пропускну здатності в необхідному напрямку. Подальшим розвитком ТК варто вважати його реорганізацію в обох (у прямому і зворотному) напрямках з реалізацією ефективних вантажно-розвантажувальних комплексів.

У загальному випадку формально визначимо поняття ТК як орієнтований елементарний просторово-розподілений граф між областями відправлення  $A$  и прибуття

В (рис. 3). З рис. 3, що ілюструє три варіанти побудови ТК, видно, що варіант ТК1 відповідає тільки доставці вантажів, варіант ТК2 - тільки поверненню вантажів, а ТК3 - об'єднанню варіантів роботи ТК1 і ТК2. Для "перекладу" рис. 3 на мову мереж Петрі досить моделювати області А та В позиціями, а стрілки – парою дуг з поділяючими їх переходами зі збереженням спрямованості.

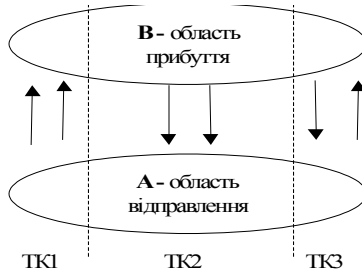
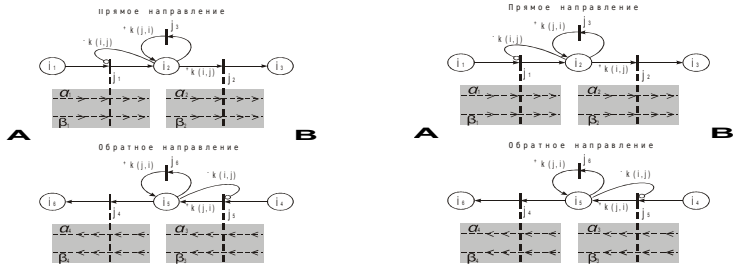


Рис. 3. Варіанти організації ТК

ТК призначається для перевезення визначених видів вантажу при відомих обсягах і термінах початку і закінчення роботи. Питання про доцільність ТК припускає, насамперед, його техніко-економічне обґрунтування. До числа факторів, що визначають можливість організації ТК у масштабах України, є пропускна здатність кожного з напрямків, а також обмеження, що існують для різних економічних регіонів. ТК, що функціонує в режимі тривалої експлуатації, повинний бути двонаправленим, а його основна мета – проведення запланованих вантажно-розвантажувальних робіт на обох "кінцях" коридору з транспортуванням вантажу між "кінцями". Істотним є повернення вагонів у точку відвантаження через установлену на практиці їхню відповідність вимогам вантажу. Розроблена в дисертації абстрактна модель ТК приведена на рис. 4, де з використанням символіки МП позначені "кінці" ТК (позиції  $i_1, i_6$  та  $i_3, i_4$ ). Позиції  $i_2$  та  $i_5$  з відповідними переходами ( $j_1-j_6$ ) формують часи проходження поїзда, а величини  $\alpha_i$  і  $\beta_j$  відображають відповідно товарний потік і супровідну інформацію. На моделі відзначена двонаправленість ТК як основна його характеристика.



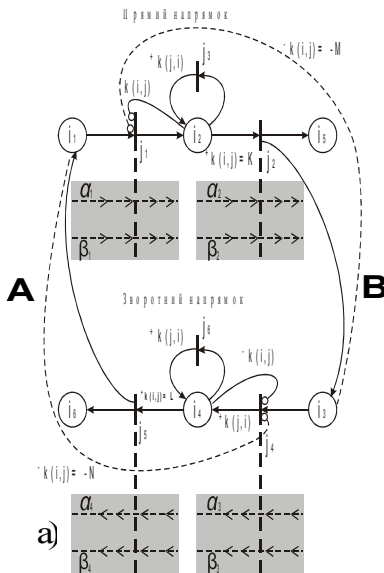
Прямий напрямок

Зворотний напрямок

Рис. 4. Абстрактна модель ТК на мережах Петрі

Конкретизація абстрактної моделі породжує макромоделі.

Розкрито зміст реальної макромоделі. Сполучимо по дві позиції рис. 4 в одну:  $i_1, i_6$  та  $i_3, i_4$ . У результаті дістанемо типову узагальнену модель одноканального ТК (рис. 5). Тут позиція  $i_5$  відбиває доставлений вантаж, а позиція  $i_6$  – кількість вагонів (поїздів), що повернулися.



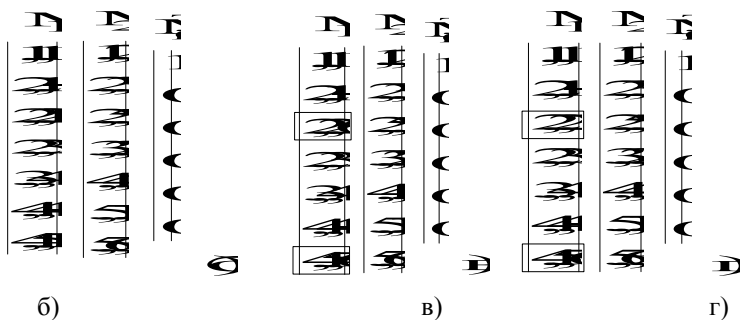
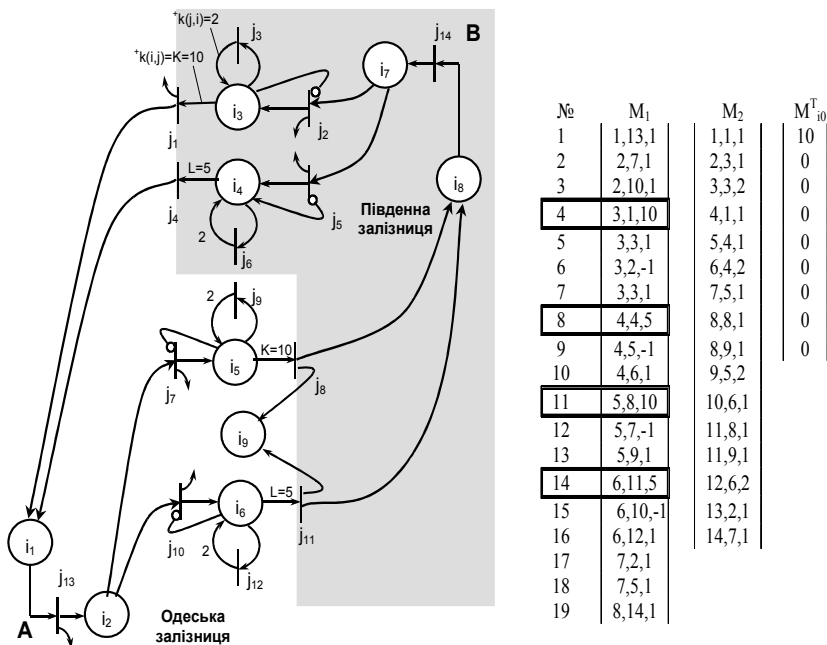


Рис. 5. Спрощена модель ТК: а) граф Петрі; матричний опис функціонування моделі: б) для довільних  $K$  і  $L$ ; в) для  $K=L=6$ , г) для  $K=6$ ,  $L=3$ ;  $K$  і  $L$  – величини, пропорційні затримкам поїздів при проходженні ними ТК;  $M$  – обмеження на вантаж;  $N$  – обмеження на число поїздів, виділених для роботи ТК

У дисертації розроблено також двохканальну модель ТК "вертикального" типу (північ - південь) (рис. 6).

Модель ТК на рис. 6 - багатоцільова. Наприклад, на ній можна промодельовати задачі визначення часу виконання транспортування заданого обсягу вантажу.



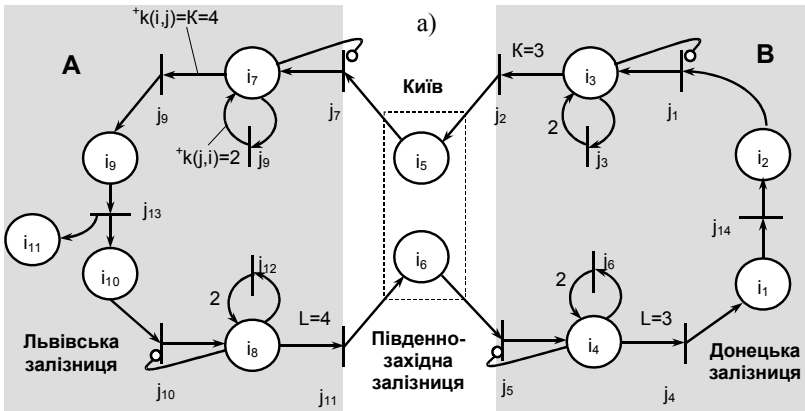
а)

б)

Рис. 6. Модель ТК "вертикального" типу: а) граф Петрі, б) матричний опис функціонування

Позиції  $i_1, i_2$  (навантаження) та  $i_7, i_8$  (розвантаження) з відповідними переходами моделюють кінці ТК, позиція  $i_9$  використовується для обліку числа поїздів. Позиції  $i_3 - i_6$  з відповідними переходами моделюють час перебування у дорозі. Як видно з матриці  $M_1$ , часи перебування поїздів (міток) у дорозі обрані рівними п'яти ( $L=5$ ) і десяти ( $K=10$ ) тактами моделювання (рядки  $M_1$  з номерами 4 і 11, а також 8 і 14 відповідно). Поїзди рухаються паралельно по двох гілках ТК із різним часом перебування у гілці. Перевага моделі полягає в тому, що вона дозволяє визначити кількість рухомого складу, необхідного для організації максимально ефективної роботи ТК.

Аналогічно розроблено макромодель ТК "горизонтального" типу (захід-схід), рис. 7. ТК проходить по трьох залізницях: Львівській, Південно-Західній і Донецькій (позиції  $i_1 - i_{10}$  – станції, а позиція  $i_{11}$  виділена для обліку кількості перевезеного вантажу; для спільності обрано різний час проходження шляху поїздами  $K=3$  і 4, а  $L=3$  і 4).



б)

$M_1$	$M_2$	$M_{i_0}^T$
1,14,1	1,3,1	10
2,1,1	2,5,1	0
3,1,-1	3,3,2	0
3,2,3	4,1,1	0
3,3,1	5,4,1	0
4,4,3	6,4,2	0
4,5,-1	7,7,1	0
4,6,1	8,9,1	0
5,7,1	9,7,2	0
6,5,1	10,8,1	0



7,7,-1	11,6,1
7,8,4	12,8,2
7,9,1	13,10,1
8,10,-1	13,11,1
8,11,4	14,2,1
8,12,1	
9,13,1	
10,10,1	

Рис. 7. Модель ТК  
"горизонтального" типу: а) мережа  
Петрі, б) матричний опис  
функціонування

Технологія побудови моделей ТК, проілюстрована вище, здобуває особливу важливість у випадку складних ситуацій, що постійно виникають у процесі перевезень. При цьому, природно, розмірність графів Петрі істотно збільшується, тому підвищиться цінність результатів моделювання для прогнозування перевезень.

**У розділі четвертому** на основі технології моделювання, розробленої в розділі три, вперше виконано моделювання багатоканальних транспортних коридорів. З цією метою розглянуто довільну структуру ТК на прикладі гіпотетичного коридору, який має три гілки навантаження поїздів, дві гілки транспортування вантажів, три гілки розвантаження та дві гілки повернення поїздів. Приклад показав неоднорідність структури такого ТК. Різниця швидкостей на дво- і трьохканальних гілках викликає утворення "пробок" (накопичення міток у позиціях переходу ТК на структуру з меншою кількістю гілок). Це є прикладом деякої слабкості евристики як методу проектування.

Крім того, розглянуто модель двохканального коридору, у якій одночасно вирішені дві задачі моделювання: власне транспортного коридору та супутньої підмоделі формування поїздів на сортувальній станції.

У результаті досліджень визначено обсяг інформації – число позицій моделі, що є раціональним для оцінки її функціонування. Воно виявилось рівним 50-60 позиціям графа, причому обидві підмоделі приблизно рівні по складності (рис. 8). Цей факт порушив питання про необхідність автоматизованої обробки інформації в програмі Winpet.

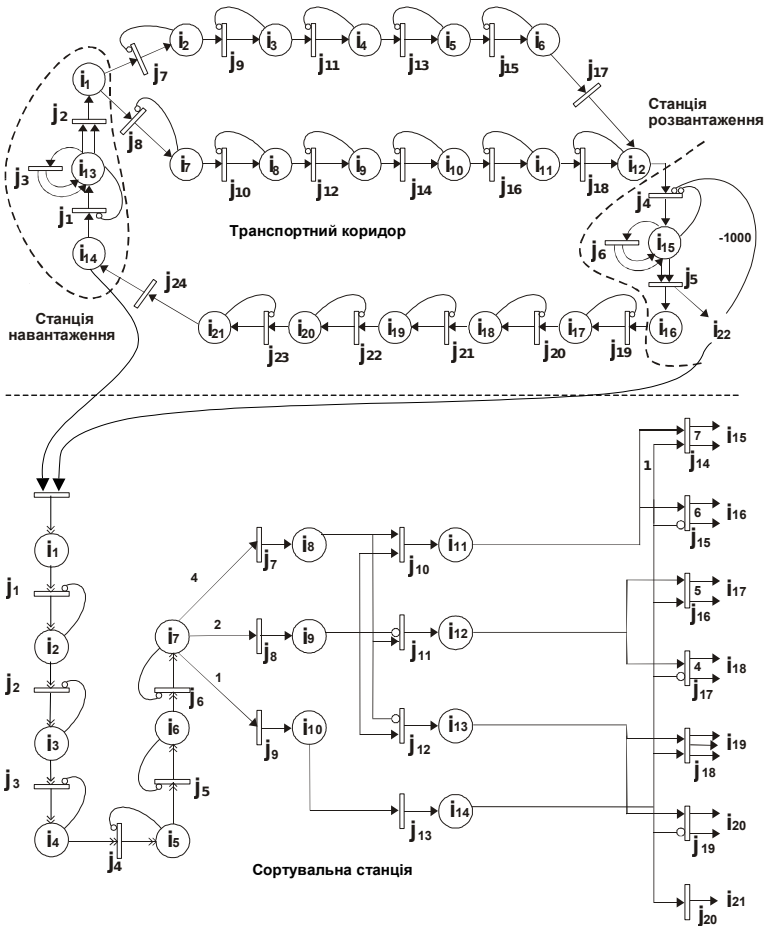


Рис. 8. Модель транспортного коридору на поширених мережах Петрі

Задачею, що значною мірою забезпечує успішну експлуатацію будь-яких ТК, є раціональне використання поїздів на кінцевих станціях ТК. Тому запропоновано модель маршрутизації відчеплень і формування поїздів на сортувальних станціях. Запропонована модель може бути застосована в режимі оперативного керування на станціях різної складності.

У розділі на мові МП розв'язано задачу моделювання технологічного процесу розвантаження бункерів, заповнених сипучим матеріалом із прибулого поїзда.

Був синтезований алгоритм розвантаження бункерів сипучих матеріалів з обмеженнями. Враховані наступні обмеження: число бункерів, що одночасно

розвантажуються, не більш трьох (для збереження стрічки транспортера); уникати розвантаження бункера на ділянку, зайняту іншим вантажем (для недопущення "пересипання" вантажу з конвеєра).

На основі виконаного дослідження, проведеного з використанням програми Winpet по розробленому для даного прикладу графу Петрі, отримані наступні результати: час розвантаження всіх семи бункерів (вантаж дорівнює 70 міткам) складає 48 тактів моделювання; повний час роботи конвеєра складає 60 тактів моделювання; під час розвантаження працювало не більше трьох бункерів; під час розвантаження було відсутнє "пересипання" шляхом вибору відповідних затримок на включення кожного бункера; розроблений оператор M', що виключає розгляд не згаданого у списку номера позиції, дає можливість вирішувати різні по обсягу технологічні задачі.

## ВИСНОВКИ

У дисертації роз'язано важливу задачу розробки наукових, методичних і прикладних основ побудови моделей, що адекватно відбивають ПП на залізничних ТК, скорочують час моделювання та витрати обчислювального ресурсу. При цьому отримані такі результати:

1. Виконаний аналіз математичних моделей процесу перевезень показав, що існуючі технології моделювання не відображають: просторової розподіленості перевезень на залізницях; експлуатаційних особливостей залізниць; комп'ютерного представлення цих процесів у динаміці. У зв'язку з цим математичні моделі перевезень по транспортних коридорах необхідно будувати на основі нових інформаційних технологій.

2. З метою опису моделей процесу перевезень на рівні, доступному широкому колу фахівців-технологів, розроблено мову моделювання на основі узагальненого математичного апарата мереж Петрі. Існуюча мова мереж Петрі доповнена новими елементами – спеціальними дугами та їх сполученнями, що збільшило образотворчі засоби мови і поширило можливості її застосування.

3. На основі введеного поширення мереж Петрі (використані нові типи дуг, у тому числі конвеєрні; відомі типи дуг отримали нову інтерпретацію як транспортні; усім дугам присвоюється важливий цілочисельний параметр – вага) розроблено технологію моделювання транспортних коридорів на основі абстрактної моделі, яка породжує макромоделі. Запропоновано макромоделі транспортних коридорів "вертикального" (південь-північ) та "горизонтального" (схід-захід) типів.

4. Розроблено моделюючу програму Winpet на основі введеного автором нового поширення мереж Петрі та технологічної мови моделювання. Winpet використовує узагальнені, автономні і пріоритетні мережі Петрі. Суттєвим є той факт, що при введенні в ПЕОМ даних, необхідних для моделювання, використовується списочний опис графу мережі Петрі замість громіздких масивів даних, які мають місце в інших методах на основі мереж Петрі. Це дає змогу спростити програмне забезпечення, верифікувати результати моделювання, зменшити обсяг пам'яті.

5. Запропоновано будувати макромоделі транспортних коридорів по одно- і двохканальній структурі, а також показана можливість побудови багатоканальних моделей. Виявлено, що двохканальні коридори скорочують час перерозподілу ресурсів у 1.5 рази.

6. Показано, що виграш у витратах часу на моделювання по запропонованому в дисертації методу в порівнянні з традиційними (на основі програмованих логічних моделей) складає 5-7 разів.

7. Запропоновано поширити метод моделювання процесу перевезень на вантажно-розвантажувальні роботи, виконувані в кінцевих пунктах коридорів.

8. Достовірність отриманих у роботі результатів підтверджується наступним: коректним використанням адекватного математичного апарата для розв'язання поставленої наукової задачі, результатами комп'ютерного моделювання на ПЕОМ, впровадження окремих результатів роботи підприємствами.

## **ПЕРЕЛІК НАДРУКОВАНИХ РОБІТ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Луханин Н.И. Адаптивная система управления тормозной позицией горки. Часть 1. Структура локального контура управления скоростью отцепы // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1999. – №4. – С.105-107.

2. Жуковицкий И.В., Пахомова В.Н., Луханин Н.И. Исследование структуры ЛВС в перспективных системах автоматизации стрелочной зоны на сортировочных горках различных типов. Часть 1 // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2000. - №4. – С.85-90.

3. Жуковицкий И.В., Загарий Г.И., Луханин Н.И. Управление замедлителями тормозной позиции сортировочной горки. Часть 1. Модель системы // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2000. - №5. – С.10-15.

4. Луханин М.І., Селецький В.С. Застосування методу декомпозиції для

моделювання підсистеми розформування на сортувальній станції // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2001. - №4. – С.16-19.

5. Семиотический анализ языка Петри и его расширений / Гусев И.В., Данько Н.И., Луханин Н.И. и др. // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2001. - №6. – С.54-58.

6. Моделирование работы транспортного коридора / Балановский А.А., Загарий Г.И., Луханин Н.И. и др. // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2001. - №5. – С.12-16.

7. Моделирование технологического процесса с помощью расширенных сетей Петри / Балановский А.А., Загарий Г.И., Луханин Н.И. и др. // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2001. - №3. – С.57-59.

8. Данько Н.И., Луханин Н.И., Михаль О.Ф. Адаптивные распределенные нечеткие управляющие системы с интеграцией эволюционного опыта на локально-параллельных алгоритмах // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2002. - №4,5. – С.60-64.

## АНОТАЦІЯ

**Луханін М.І. Моделювання залізничних транспортних коридорів на базі поширених мереж Петрі. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – "Експлуатація і ремонт засобів транспорту". Українська державна академія залізничного транспорту, м. Харків, 2003.

Дисертація присвячена розробці технології моделювання залізничних транспортних коридорів на основі використання узагальненого класу математичного апарата мереж Петрі, який поширено для врахування особливостей перевезень на залізничному транспорті. В якості поширень введено нову структурну модель обслуговування, яка визначає затримки часу; деяким дугам графа надана властивість конвеєрності; поширено можливості стримуючих дуг за рахунок надання їм ваги більшої одиниці. Розроблено нову технологічну мову моделювання і просту програму Winpet, яка для моделювання використовує спискові дані. У процесі моделювання приймають участь тільки технологи без програмістів. Одержані результати впроваджені у виробництво.

**Ключові слова:** залізничний транспорт, транспортні коридори, поширені мережі Петрі, дуги графа, моделювання, макромодель, програмне забезпечення.

## АННОТАЦИЯ

**Луханин Н.И. Моделирование железнодорожных транспортных коридоров на базе расширенных сетей Петри. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.20 – "Эксплуатация и ремонт средств транспорта". Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, г. Харьков, 2003.

Диссертация посвящена разработке технологии моделирования железнодорожных транспортных коридоров на основе использования обобщенного класса математического аппарата сетей Петри. Аппарат существующих сетей Петри расширен для реализации особенностей транспортных коридоров на железных дорогах. Впервые: для моделирования задержек времени разработана структурная модель обслуживания; некоторым дугам придано свойство конвейерности; всем сдерживающим дугам придано свойство иметь вес больший или равный единицы. Свойство конвейерности дало возможность отслеживать при моделировании процессы передачи грузов и сопроводительной информации, характеризующей перевозки. С целью описания моделей процесса перевозок на уровне, доступном широкому кругу специалистов-технологов, разработан язык моделирования на основе обобщенного математического аппарата сетей Петри. Существующий язык сетей Петри дополнен новыми элементами – специальными дугами и их объединениями, что увеличивает изобразительные возможности языка и расширяет область его применения. На основе введенного расширения сетей Петри (использованы новые типы дуг, в том числе конвейерные; известные типы дуг получили новую интерпретацию как транспортные; всем дугам присвоен важный целочисленный параметр – вес) разработана технология моделирования на основе абстрактных моделей, порождающих макромодели. Предложены макромодели транспортных коридоров "вертикального" (север-юг) и "горизонтального" (восток-запад) типов. Разработана программа моделирования Winpet на основе введенных автором расширений и нового технологического языка моделирования. Программа Winpet использует обобщенные, автономные и приоритетные сети Петри. Существенным является то, что при введении в ПЭВМ исходных данных, необходимых для моделирования, используется списочное описание сети Петри вместо громоздких массивов данных, которые используются в других методах

моделирования (на основе сетей Петри). Это дало возможность упростить программное обеспечение, верифицировать результаты моделирования, сократить объем памяти. Предложены макромодели транспортных коридоров, построенные по одно- и двухканальной структурам, а также показана возможность реализации многоканальных моделей. Определено, что двухканальные коридоры сокращают время перераспределения ресурсов (поездов) в 1.5 раза.

**Ключевые слова:** железнодорожные транспортные коридоры, расширенные сети Петри, дуги графа, моделирование, макромодель, программное обеспечение.

## SUMMARY

**Luhanin N.I. simulation of railway transport corridors on the base of extended Petri nets. - Manuscript.**

The dissertation on competition of a scientific degree of candidate of engineering science on a speciality 05.22.20 – “Exploitation and repair of transport means”, Ukrainian state academy of a railway transportation, Kharkov, 2003.

The work is devoted to the development of simulation technology of railway transport corridors based on utilization of the generalized class of mathematical instrument of Petri nets which is extended for consideration of conveyance peculiarities along transport corridors. As an extension the new structural model is introduced which determines time delay; pipeline characteristics are given to some edges of a graph; possibility of delaying edges of a graph is extended because of appropriation to them of the weight which is more than unit. New technological language of simulation and simple Winpet program are developed. For this program introduction of the data list is necessary in the course of the simulation. In this case only the technical workers are required without programmer participation. Obtained scientific and practical results are introduced.

**Key words:** railway transport corridor, extended petri nets, edges of a graph, simulation, macromodel, software.

# **Моделювання залізничних транспортних коридорів на базі поширених мереж Петрі**

05.22.20 - Експлуатація та ремонт засобів транспорту

## **А в т о р е ф е р а т**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Відповідальний за випуск

к.т.н., доцент Коновалов В.С.

Підписано до друку 12.05.2003 р.

Формат паперу 64x84 1/16. Папір офсетний

Умовн.-друк. арк. 0,9. Обл. – вид. арк. 1,0

Замовлення №\_\_\_\_\_. Тираж 100 прим.

---

Видавництво УкрДАЗТу. Свідоцтво № 112 від 06.07.2000 р.

61050, м. Харків, пл. Фейєрбаха, 7

Друкарня УкрДАЗТу, 61050, м. Харків, пл. Фейєрбаха, 7