

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**АРКАТОВ ДЕНИС БОРИСОВИЧ**



УДК 004.9:510.635

**МОДЕЛІ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЇ РУХУ ДЛЯ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ В УМОВАХ ЧАСОВИХ ОБМЕЖЕНЬ**

Спеціальність 05.13.06 – інформаційні технології

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник** кандидат технічних наук, доцент  
**Чередніченко Ольга Юріївна**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
доцент кафедри програмної інженерії та  
інформаційних технологій управління

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Шостак Ігор Володимирович**,  
Національний аерокосмічний університет  
імені М. Є. Жуковського «Харківський  
авіаційний інститут», професор кафедри інженерії  
програмного забезпечення

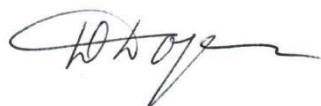
доктор технічних наук, професор  
**Удовенко Сергій Григорович**,  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки, професор кафедри електронних  
обчислювальних машин

Захист відбудеться « 30 » серпня 2016 р. о 14.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.07 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою:  
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою:  
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий «    » липня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Дорофєєв Ю. І.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми дослідження.** Інтеграція сучасних супутникових технологій, систем зв'язку і передачі даних забезпечує підвищення якості залізничного транспорту. Важливо не тільки оснастити рухомі засоби супутниковими навігаційними приймачами, але й також забезпечити ефективну обробку параметрів руху транспорту на основі інформаційної технології обробки даних та прийняття рішень.

На залізничному транспорті присутні випадки, коли відмова підлогових пристроїв, несправності, які виникають в потягах за умови високої інтенсивності руху, або «людський фактор» призводить до порушення графіків і масових затримок на всій ділянці залізниці. У зв'язку з цим доцільним є впровадження моделей і методів технології обробки даних для автоматизації диспетчерського управління залізничного транспорту, оскільки поправки, внесені диспетчером, мають досить великий лаг прийняття управлінських рішень і не базуються в прямому контексті з мінімізацією наслідків збоїв в залізничному русі.

Питання розробки інформаційної технології диспетчеризації, яка в свою чергу базується на математичному апараті координації руху транспорту, розглядаються в роботах Михалевича В.С., Волковича В.Л., Акінфієва В.К., Цвіркуна А.Д., Ладанюка А.П., Годлевського М.Д. та інших. Свій внесок в дослідження питань організації руху та перевезень додали Тартаковський Е.Д., Грошев Г.М., Петраков Г.П., Веленга Д., Макітало М., Даніленко Е.І. Інформаційні аспекти управління складними транспортними системами досліджуються в роботах Самсонкіна В.М., Друзя В.А., Федоровича О.С., Данько М.І. та інших вчених.

Для створення автоматизованої системи зв'язку та передачі даних для залізничного транспорту, крім використання супутникової навігації, необхідно обрати стандарт зв'язку, який задовольняє необхідним вимогам щодо функціонування всієї системи в цілому. Використання паралельних обчислень є стратегічним напрямом розвитку системи зв'язку і передачі даних автоматизованої системи диспетчеризації руху, що викликано не тільки принциповим обмеженням максимально можливої швидкодії звичайних послідовних персональних комп'ютерів, але і постійною необхідністю здійснення прийняття рішень за досить малий інтервал часу.

Таким чином, створення моделей та інформаційної технології диспетчеризації руху для залізничного транспорту в умовах часових обмежень є актуальною задачею. Теоретична і практична значущість автоматизації диспетчерського управління залізничним транспортом, зокрема в умовах обмежень на час пошуку компромісного рішення, визначила напрям дисертаційного дослідження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі програмної інженерії та інформаційних технологій управління НТУ «ХПІ» в межах держбюджетних тем МОН України: «Розробка систем підтримки прийняття рішень з управління розвитком складних розподілених техніко-економічних та соціально-

економічних систем» (ДР № 0111U002287) та «Розробка інформаційно-аналітичних технологій стратегічного управління ієрархічними розподіленими системами» (ДР № 0113U000452), в яких здобувач брав участь при виконанні окремих етапів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є підвищення безпеки руху та ефективності перевезень за рахунок мінімізації витрат на диспетчерське управління шляхом зниження часу обробки навігаційних даних та прийняття рішень на основі розробки моделей та інформаційної технології диспетчеризації залізничного транспорту.

Для досягнення цієї мети поставлені наступні задачі:

- дослідити сучасні системи автоматизованого управління залізничним транспортом, проаналізувати існуючі системи диспетчеризації залізниць, визначити можливості сучасних інформаційних технологій зв'язку і передачі даних для автоматизації диспетчерського управління;

- розробити комплексний підхід до вирішення задачі диспетчеризації залізничного транспорту для забезпечення безпеки руху з урахуванням інтервалу часу актуальності вихідних даних;

- розробити модель паралельної обробки даних для розв'язання задачі диспетчеризації для підвищення обчислювальної здатності алгоритмів та отримання результату в умовах обмеження на актуальність даних;

- розробити модель оцінювання пропускнуої здатності каналу передачі даних для вибору технологій зв'язку, що використовуються при реалізації автоматизованої системи диспетчеризації руху;

- розробити інформаційну технологію на основі мультиагентного підходу для автоматизації процесу диспетчерського управління на залізничному транспорті;

- провести апробацію розроблених моделей та алгоритмів на основі імітаційного моделювання залізничного трафіку.

*Об'єктом дослідження* є диспетчеризація руху залізничного транспорту.

*Предметом дослідження* є моделі та інформаційна технологія процесу передачі даних і диспетчеризації руху залізничного транспорту.

**Методи досліджень.** Теоретичні та методологічні основи розробки автоматизованої системи диспетчеризації руху залізничного транспорту складають: теорія диспетчеризації залізничного транспорту, теорія мереж передачі даних, агентна парадигма імітаційного моделювання та теорія розподілених ієрархічних систем. Методи системного аналізу, оптимізаційно-імітаційний підхід, методи теорії розподілених систем управління використано для розробки комплексного підходу до вирішення задачі диспетчеризації; методи багатокритеріальної оптимізації та теорії прийняття рішень – для побудови моделі диспетчерського управління; методи імітаційного моделювання та теорії ймовірностей – для побудови моделі визначення пропускнуої здатності каналу передачі даних; методи теорії паралельних обчислень – для оптимізації обчислювальної здатності алгоритмів; уніфікована мова моделювання UML та методологія агентно-орієнтованого

програмування – для проектування та реалізації інформаційної технології диспетчеризації руху.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

*вперше* розроблено інформаційну технологію мультиагентного диспетчерського управління залізничним транспортом, яка дозволяє здійснювати оперативну координацію рухом в режимі реального часу на основі оптимізаційно-імітаційного підходу з урахуванням навігаційної інформації і оцінок каналу передачі даних;

*удосконалено* імітаційну мультиагентну модель диспетчеризації руху залізничного транспорту, що дозволяє учасникам руху автономно здійснювати пошук вирішення виникаючих ситуацій порушення умов безпеки руху в режимі реального часу, шляхом моделювання поведінки всіх учасників руху в віртуальному просторі на основі поточної навігаційної інформації;

*удосконалено* метод диспетчерського управління рухом залізничного транспорту, який на основі імітаційного моделювання дозволяє враховувати обмеження на часовий інтервал пошуку рішення і особливості технологій передачі даних, шляхом врахування географічної розподіленості системи диспетчерського управління, багатокритеріальності задачі і визначення часових обмежень;

*набула подальшого розвитку* імітаційна модель моніторингу каналу передачі навігаційних даних, що на основі моделювання процесу у режимі реального часу дозволяє враховувати доцільність даних диспетчерського управління в задачі підтримки прийняття рішень.

**Практичне значення одержаних результатів** для залізничного транспорту полягає у розробці методичних рекомендацій щодо організації процесу автоматизації диспетчерського управління залізничним транспортом, які забезпечують підвищення рівня безпеки руху та якості перевезень. Запропоновано концептуальну модель диспетчеризації, яка є основою для побудови автоматизованої системи диспетчеризації руху. Розроблена інформаційна технологія диспетчерського управління дозволяє автоматизувати процес підтримки прийняття рішень диспетчером та машиністом в процесі функціонування залізничного транспорту та пройшла реальну апробацію, що підтверджується актами про використання автоматизованої системи диспетчеризації руху на основі мультиагентних технологій у ВП «Основ'янська колійно-машинна станція» регіональної філії «Південна залізниця» ПАТ «Українська залізниця» (м. Харків). Результати моделювання каналу передачі даних та прототип програмної системи рекомендовано для практичного впровадження у ТОВ «Сайтосс» (м. Харків) для проектування модулів білінгової системи.

Результати досліджень використовуються у навчальному процесі кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління НТУ «ХПІ» у дисциплінах «Проектування інформаційних систем», «Сучасні методи управління динамічними об'єктами та технологічними процесами», «Розподілене програмне забезпечення інтелектуальних систем», «Імітаційне моделювання», «Проектування інформаційних систем управління».

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто, серед них: концептуальна модель декомпозиції задач диспетчерського управління; імітаційна модель визначення пропускну здатності каналу передачі даних; метод вирішення задачі диспетчеризації в паралельному режимі; модель оцінки безпеки руху; інформаційна технологія диспетчерського управління залізничним транспортом на основі мультиагентного підходу.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2012, 2013); XIX Міжнародній конференції з автоматичного управління (Київ, 2012); X Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні технології в економіці та управлінні підприємствами, програмами та проектами» (Алушта, 2012); VIII International Conference on ICT in Education, Research, and Industrial Applications ICTERI (Херсон, 2013).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковані у 12 наукових працях, серед яких 7 статей у фахових наукових виданнях України (2 – у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз), 5 – у матеріалах конференцій.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 161 сторінку, з них 42 рисунки по тексту, 5 таблиць по тексту, 183 найменування використаних джерел на 17 сторінках, 6 додатків на 18 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовані мета та задачі дослідження, охарактеризовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено інформацію про впровадження результатів роботи, їх апробацію та публікації.

У **першому розділі** проведено аналіз різних інформаційних систем, що дозволяють автоматизувати процеси диспетчерського управління залізничного транспорту. Відзначимо, що задача диспетчерського управління і координації руху в існуючих автоматизованих системах потребує подальшого узагальнення. Про це свідчить виконання корекції розкладу руху переважно диспетчерами та відсутність автоматизації цього процесу в режимі реального часу. Виявлено, що перспективними є організація допомоги в прийнятті рішень машиністом та контроль актуальності даних, які передаються на рухомий засіб (РЗ). Тому пропонується доповнити існуючу автоматизовану систему залізничного транспорту за рахунок реалізації інформаційної системи диспетчеризації руху, яка представлена на рис. 1.

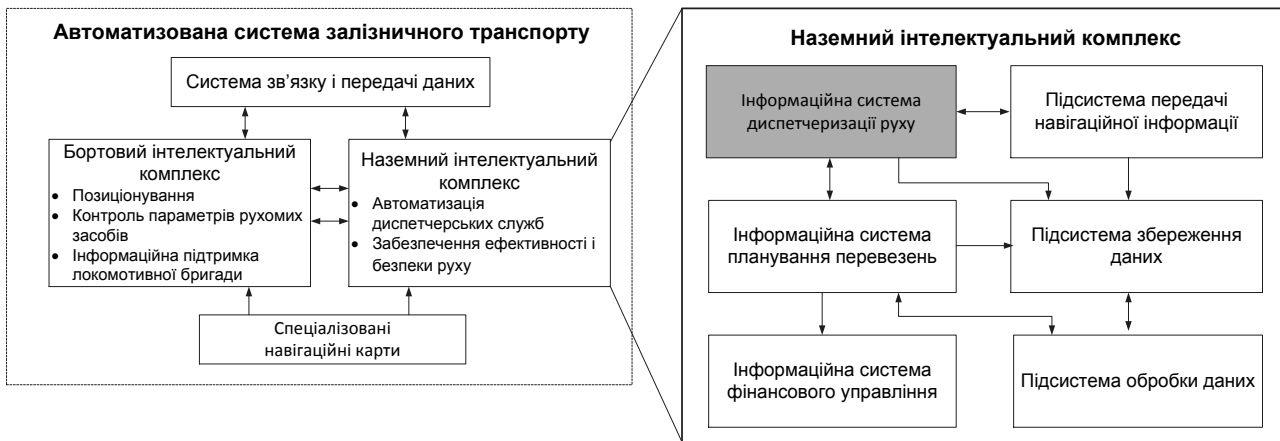


Рисунок 1 – Інформаційна система диспетчеризації руху у складі наземного інтелектуального комплексу

Інформація про розклад залізничних перевезень і фактичну кількість РЗ є початковою для подальших розрахунків пропускної спроможності системи зв'язку і передачі даних автоматизованої системи (АС), що забезпечує виконання умови актуальності отриманих даних і вирішення задачі диспетчеризації руху в режимі реального часу.

Другий розділ присвячено розробці концептуальних моделей інформаційного обміну і диспетчеризації руху, які представлено на рис. 2, та їх реалізації засобами формальної архітектури агента.

В якості технології передачі даних, що задовольняє вимогам щодо функціонування інформаційної системи диспетчеризації руху залізничного транспорту, обрано GPRS.

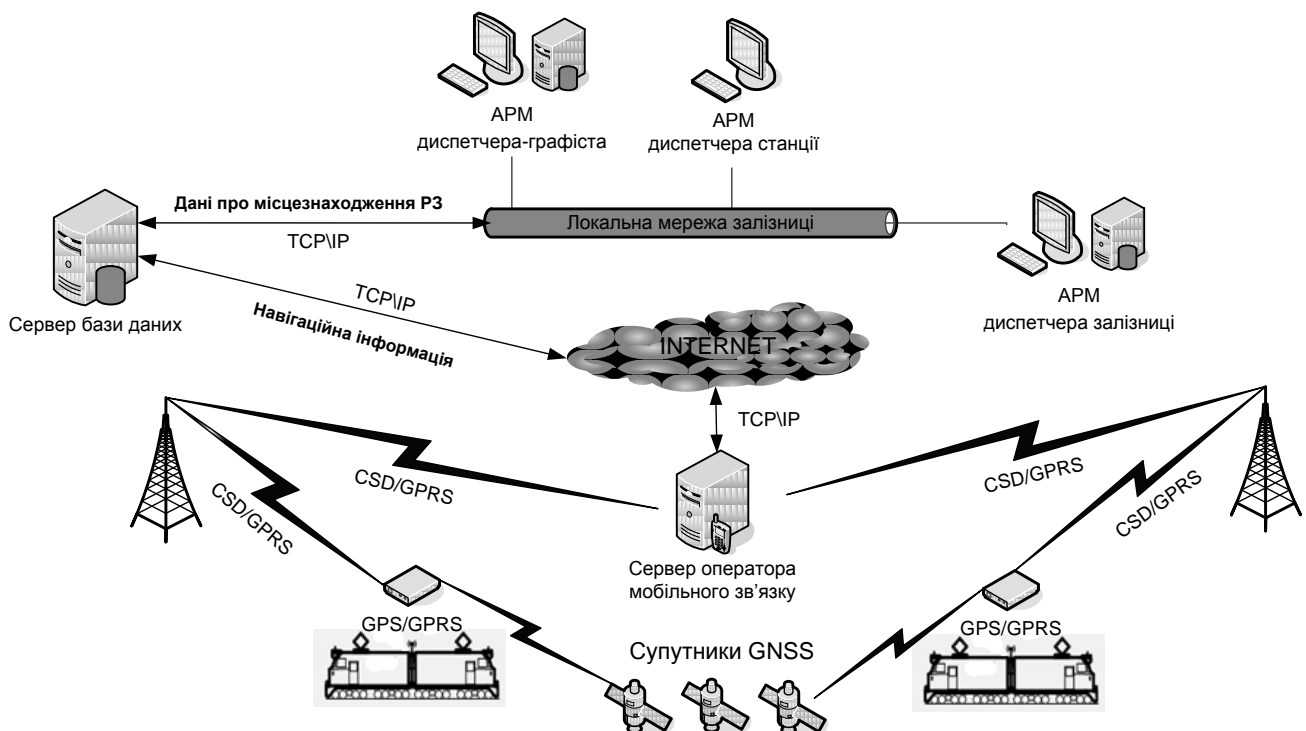


Рисунок 2 – Схема інформаційного обміну системи диспетчеризації руху

Вирішення задачі диспетчеризації руху залізничного транспорту пропонується здійснювати на основі оптимізаційно-імітаційного підходу, який представлено на рис. 3.

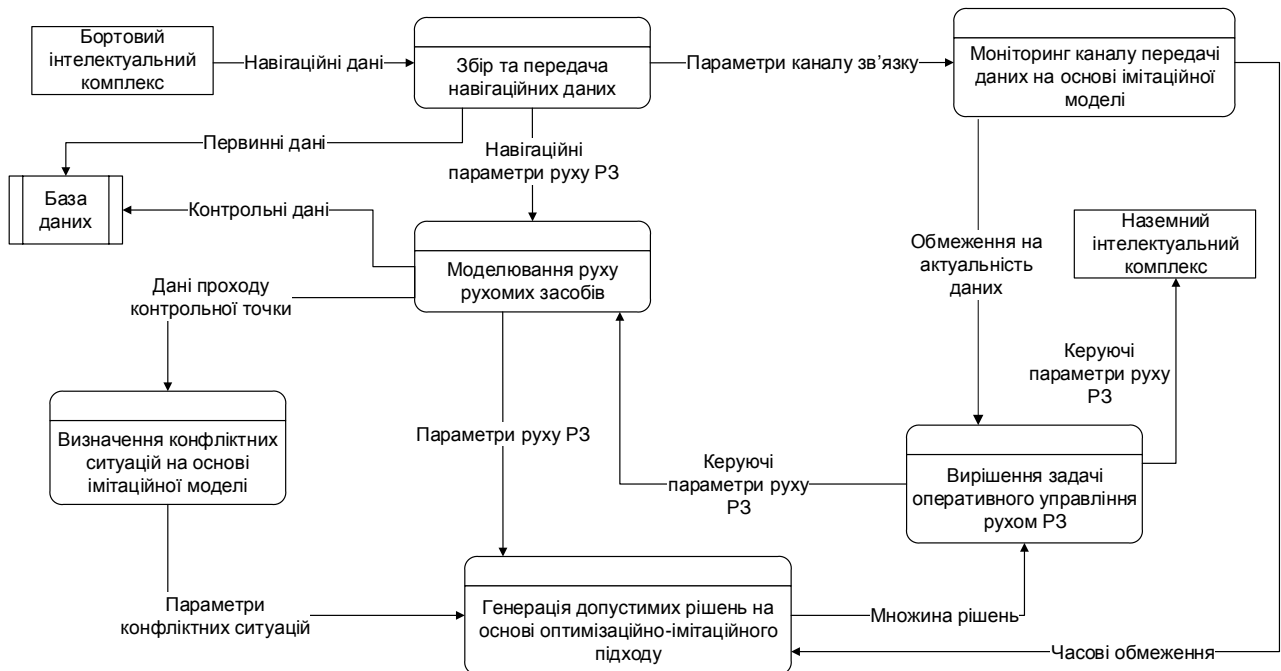


Рисунок 3 – Загальна схема вирішення задачі на основі оптимізаційно-імітаційного підходу

Особливістю системи диспетчеризації руху є прив'язка до часу і заданий час актуальності даних. Порядок збору даних з РЗ (рис. 4):  $\Delta t_1$  – період збору даних,  $\Delta t_2$  – період обробки даних,  $\Delta t_3$  – період відправлення керуючого повідомлення,  $T$  – час, протягом якого дані вважаються актуальними, тобто час на прийняття рішення щодо координації руху.

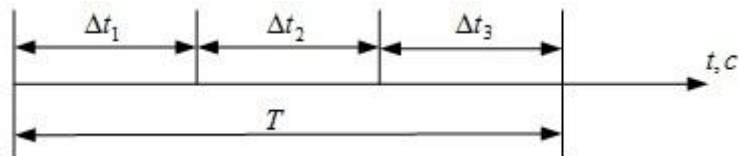


Рисунок 4 – Прив'язка збору навігаційних даних до часу

Система диспетчерського управління залізничним транспортом є дворівневою ієрархічною системою (рис. 5), в якій диспетчерські зони (ДЗ) є підсистемами нижнього рівня, а залізнична зона України – підсистемою верхнього рівня. В той же час система диспетчеризації руху множини потягів, що знаходяться в деякій зоні управління, повинна забезпечити вирішення наступних основних задач: перша полягає у визначенні черговості і істинного часу прибуття або відправлення потягів з урахуванням безпеки на залізничних перегонах; друга – в забезпеченні безпеки руху в режимі реального часу.

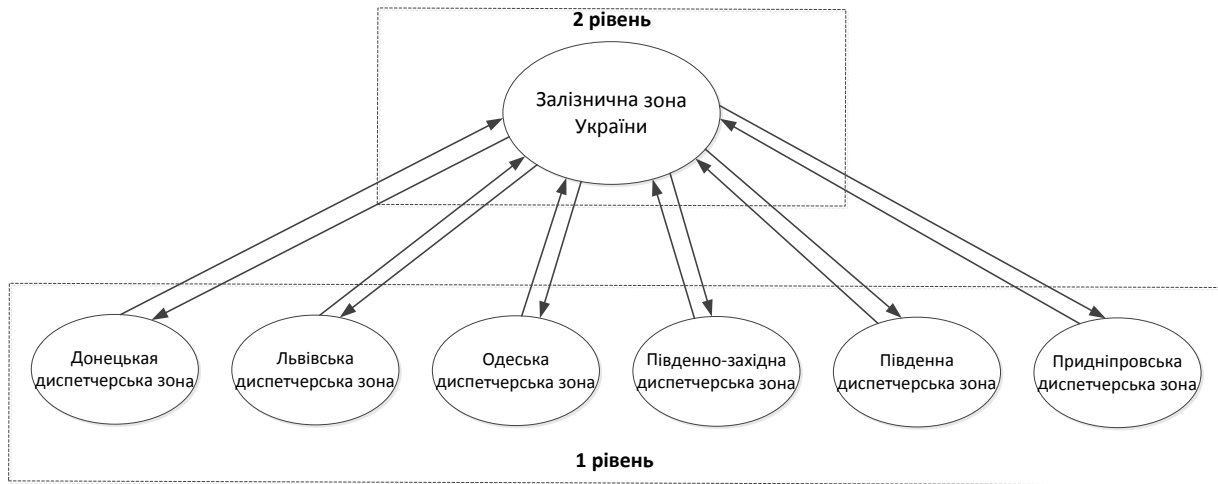
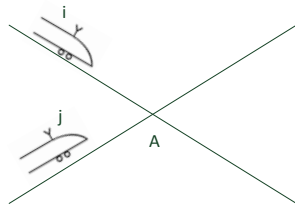


Рисунок 5 – Дворівнева ієрархічна система диспетчерського управління залізничним транспортом

Виділяються наступні основні типи небезпечних ситуацій у рамках однієї ДЗ, для яких формулюються умови безпеки руху:

1. Ситуація «пересічних курсів» (рис. 6)

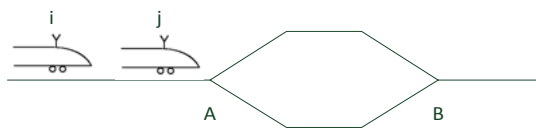


$$|t_i^A - t_j^A| \geq \Delta t^A, \quad (1)$$

Рисунок 6 – Схема «пересічних курсів»

де  $t_i^A$ ,  $t_j^A$  – час проходження точки  $A$  потягами  $i, j$  відповідно;  $\Delta t^A$  – мінімально допустимий часовий інтервал зближення потягів в точці  $A$ .

2. Ситуація «обгону» (рис. 7)



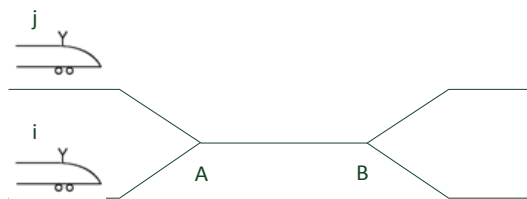
$$\begin{aligned} |t_i^A - t_j^A| &\geq \Delta t^A, \\ |t_i^B - t_j^B| &\geq \Delta t^B, \end{aligned} \quad (2)$$

Рисунок 7 – Схема «обгону»

$$(t_i^A - t_j^A)(t_i^B - t_j^B) < 0,$$

де  $t_i^B$ ,  $t_j^B$  – час проходження точки  $B$  потягами  $i, j$ , відповідно;  $\Delta t^B$  – мінімально допустимий часовий інтервал зближення потягів в точці  $B$ .

3. Ситуація «спільного перегону» (рис. 8)



$$\begin{aligned} |t_i^A - t_j^A| &\geq \Delta t^A, \\ |t_i^B - t_j^B| &\geq \Delta t^B, \end{aligned} \quad (3)$$

Рисунок 8 – Схема «спільного перегону»

$$(t_i^A - t_j^A)(t_i^B - t_j^B) > 0.$$

Таким чином, мінімізація кількості випадків невиконання умов (1) – (3) забезпечує пріоритетну умову безпеки руху.

Введені наступні критерії оптимальності задачі диспетчеризації руху:

1. Критерій оптимізації процесу перевезення

$$f_1^\beta = K_t T + K_r R_t \rightarrow \min ,$$

де  $T$  – час перебування потяга на ділянці, год.;  $K_t$  – витратна ставка однієї години знаходження потяга на ділянці, грн./потяго-год.;  $K_r$  – механічна робота тягової сили локомотива, тс·км;  $R_t$  – витратна ставка механічної роботи локомотива, грн./(тс·км).

2. Критерій, що враховує витрати на управління

$$f_2^\beta = c_j^\beta u_j^\beta \rightarrow \min , u_j^\beta \in U ,$$

де  $u_j^\beta$  –  $j$ -й вид управляючого параметра  $\beta$ -м потягом;  $c_j^\beta$  – ваговий коефіцієнт  $j$ -го управляючого параметра;  $U$  – множина управляючих параметрів.

Для реалізації системи диспетчеризації руху обрано агентно-орієнтовану парадигму. Представлення можливих дій агента та його взаємодії з зовнішнім середовищем (рис. 9) здійснено через інструмент, який дозволяє проектувати поведінку агента із використанням чітких формальних методів, на відміну від абстрактної архітектури агента, яка задається через опис середовища, в якому функціонує агент, сприйняття агентом цього середовища та його діями.

Внутрішня структура агента описується у вигляді кортежу

$$KS = (S, A, P, G, M),$$

де  $S = \{s_i\}_{i=1}^n$  – множина станів зовнішнього середовища;  $A = \{a_i\}_{i=1}^n$  – множина можливих дій агента;  $P = \{p_i\}_{i=1}^n$  – множина сприйняття агента;  $G = \{g_i\}_{i=1}^n$  – множина функцій агента;  $M = \{m_i\}_{i=1}^n$  – множина внутрішніх станів агента.

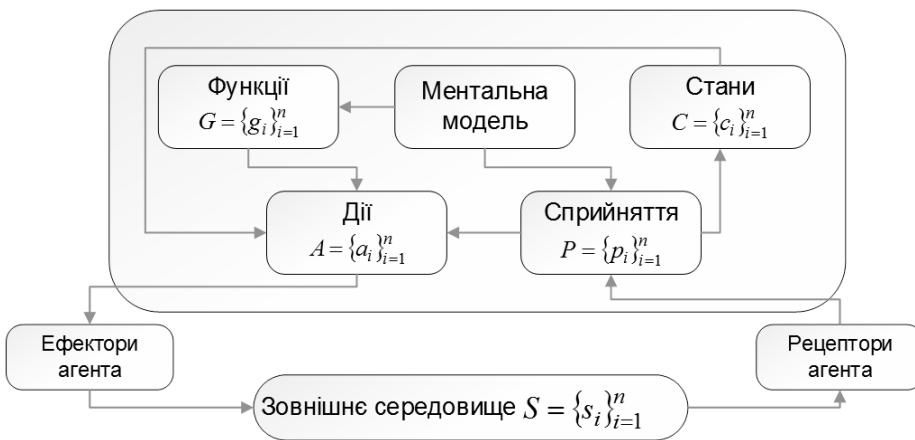


Рисунок 9 – Формальна архітектура агента

Множина різноманітних типів конфліктних ситуацій позначається як  $C = \{c_i\}_{i=1}^m$ .

Вважається, що для  $\forall c \in C$  існує агент або група агентів, які в сукупності гарантують умови безпеки руху і формують компромісний

управляючий вплив. Тоді  $\{v_i(c), d_i(c)\}$  визначає набір обсягів ресурсів і

тривалість їх використання при забезпеченні безпеки руху і повернення РЗ в графік.

Кожна ситуація порушення умов безпеки руху характеризується часом проходження контрольної точки  $t_{cp}$ , максимально можливим часом вироблення управляючої дії  $t_{max}$ , а також часом на обробку отриманих даних  $t_{pr}$

$$c = c(t_{cp}, t_{max}, t_{pr}).$$

Загальний обсяг ресурсів, необхідний для забезпечення безпеки руху в контрольній точці, визначається за формулою

$$V = \sum_{i=1}^m v_i(c) d_i(c).$$

Кожній ситуації порушення умов безпеки руху відповідає певна група агентів, яка пов'язана з її вирішенням. Таким чином, накладається наступне обмеження

$$\forall a \in A, \sum_i x_i v_i(a) \geq V_{min},$$

де  $V_{min}$  – мінімальний обсяг ресурсів, необхідний для вирішення ситуації порушення умов безпеки руху  $c$ ,  $x_i$  – загальний обсяг  $i$ -го ресурсу.

Для опису поведінки агентів використовується діаграма станів (рис. 10), яка дозволяє визначити можливі стани агента, переходи між ними, події, що викликають ці переходи, часові затримки і дії, що здійснюються агентом упродовж життєвого циклу.



Рисунок 10 – Діаграма станів агента

Таким чином, розроблена концептуальна модель обміну даними та диспетчеризації руху є основою для інформаційної технології, яка дозволяє автоматизувати процес управління. Запропонована формальна архітектура агента дозволяє моделювати процес взаємодії агентів при гарантуванні безпеки руху і пошуку компромісних керуючих впливів при розв'язанні задачі диспетчеризації руху залізничного транспорту.

У **третьому розділі** вирішуються задачі розробки основи інформаційної технології на базі моделей декомпозиції, паралельної обробки даних, диспетчеризації руху в паралельному режимі на основі багатоагентної реалізації, а також моделювання каналу передачі даних для контролю його пропускної спроможності.

Вважається, що в  $i$ -й диспетчерській зоні управління знаходиться деяка множина потягів  $S_i = \{1, 2, \dots, j, \dots, N-1\}$ , для якої визначено дійсний час прибуття і відправлення  $t_j^r$  ( $r \in S$ ),  $j \in S_i^*$  з урахуванням безпеки залізничного руху на шляхах. На навігаційній карті задана множина контрольних точок  $P_i = \{1, \dots, M_i\}$ . Для кожного потяга з множини  $S_i$  з урахуванням оперативної інформації визначається розрахунковий час відправлення і прибуття  $t^r$  ( $r = 1, \dots, N-1$ ). При появі  $N$ -го потяга з розрахунковим часом  $t_x^N$  визначається його черговість прибуття за умови виконання нерівності

$$t_{i-1}^r < t_x^N < t_i^{S_i}.$$

Тоді встановлюється  $x = i$ , а нижні індекси потягів, починаючи з  $t_j^S$ , збільшуються на одиницю. У подальшому здійснюється перевірка умов безпеки руху:

$$t_i^N - t_{i-1}^{r^*} \geq \tau, \quad t_{i+1}^{S_i^*} - t_i^N \geq \tau, \quad (4)$$

де  $\tau$  – мінімально безпечний інтервал між потягами на залізничній колії, з якої здійснюється прибуття або відправлення. Коли обидві нерівності виконуються, дійсний час  $N$ -го потяга дорівнює  $t_i^N = t_i^{N^*}$ . Якщо хоч би одна з наведених умов безпеки руху (4) не виконується, то для  $N$ -го потяга умова безпеки не гарантується і виникає ситуація порушення умов безпеки руху. При усуненні цього стану можливе невиконання умов безпеки руху для інших потягів множини  $S_i$ . Усі потяги, для яких ця умова порушується, утворюють підмножину  $S_{1i}^* \subset S_i^*$ . Потужність  $S_{1i}^*$  дорівнює кількості потягів, пов'язаних між собою, для яких виконуються нерівності:

$$t_{i-m}^p - t_{i-m+1}^{r^*} \leq \theta\tau, \quad m = 2, \dots, i-1; \quad t_{i+n}^{s^*} - t_{i+n-1}^{q^*} \leq \theta\tau, \quad n = 2, \dots, N-i; \quad (p, q, r, s \in S_i),$$

де  $\theta = 2$ , оскільки усі потяги, окрім  $p$ -го, розділені безпечним інтервалом  $\tau$ ;  $t_{i-m}^p$  – час прибуття або відправлення потяга, порядковий номер якого відрізняється від  $p$ -го на  $m$  одиниць (аналогічно слід розуміти  $t_{i+n-1}^{q^*}$ ).

Нехай для  $n_1$  і  $m_1$  умови (1) – (3) не виконуються, тоді потужність підмножини  $S_{1i}^*$  дорівнює  $n_1 + m_1$  і  $S_{1i}^* = \{i - m_1, i - m_1 + 1, \dots, i + n_1 - 1\}$ . Для потягів цієї підмножини знову вирішується задача визначення дійсного часу прибуття або відправлення з урахуванням безпеки руху на залізничних коліях, яка

полягає в наступному. Визначаються затримки  $\Delta t_j^r$  для потягів підмножини  $S_1^*$ , які мінімізують лінійну форму:

$$\min F = \sum_{j=i-m_1+1}^{i+n_1-1} c_j |\Delta t_j^r|, \quad j \in S_{1i}^*, \quad r \in S_i,$$

де  $c_j$  – вагові коефіцієнти  $j$ -го потяга, які враховують собівартість однієї виробничої години для оптимального режиму їзди потяга. Безпека руху на залізничних коліях накладає на  $\Delta t_j^r$  обмеження

$$t_{j+1}^r - \Delta t_{j+1}^r - t_j^s + \Delta t_j^s \geq \tau, \quad j = i - m_1 + 1, \dots, i + n_1 - 1, \quad r, s \in S_i$$

де  $t_j^{s*} = t_j^s - \Delta t_j^s$  – дійсний час прибуття  $s$ -го потяга з черговістю  $j \in S_{1i}^*$ .

Після формування управляючих дій виконується перевірка можливості їх реалізації РЗ. Якщо їх застосувати неможливо до проходження точки, в якій виникає ситуація порушення умов безпеки руху, то необхідно сформувати нові управляючі дії з метою повернення РЗ в графік до наступної контрольної точки.

Пропускна спроможність каналу передачі даних визначається як середня довжина черги в системі при нескінченному розмірі буфера ( $M/G/1$ ) і розраховується за класичною формулою Хінчіна-Полячека

$$\bar{t}_q = \frac{\bar{q}}{\lambda} = \bar{t}_s \times \left[ 1 + \rho \frac{1 + C_s^2}{2(1 - \rho)} \right],$$

де  $\bar{q}$  – середня довжина черги в даній системі (у числі протокольних блоків);

$\rho = \frac{\lambda}{\mu} < 1$  – інтенсивність навантаження системи  $M/G/1$ ;  $\lambda, \mu$  – значення

інтенсивності надходження й обслуговування пакетів у системі;  $\bar{t}_s$  – середній

час обслуговування у системі;  $C_s^2 = \frac{D(t_s)}{(\bar{t}_s)^2}$  – квадратичний коефіцієнт варіації

часу обслуговування, що дорівнює відношенню дисперсії часу обслуговування до квадрата його математичного очікування.

Нехай  $p$  – це кількість серверів, що використовуються для виконання алгоритму диспетчеризації руху. Тоді для паралельного виконання обчислень необхідно задати множину (розклад виконання операцій)

$$H_p = \{(i, P_i, t_i) : i \in V\},$$

у якій для кожної операції  $i \in V$  вказується номер сервера, який використано для виконання операції диспетчерської зони  $P_i$ , і час початку виконання операції  $t_i$ .

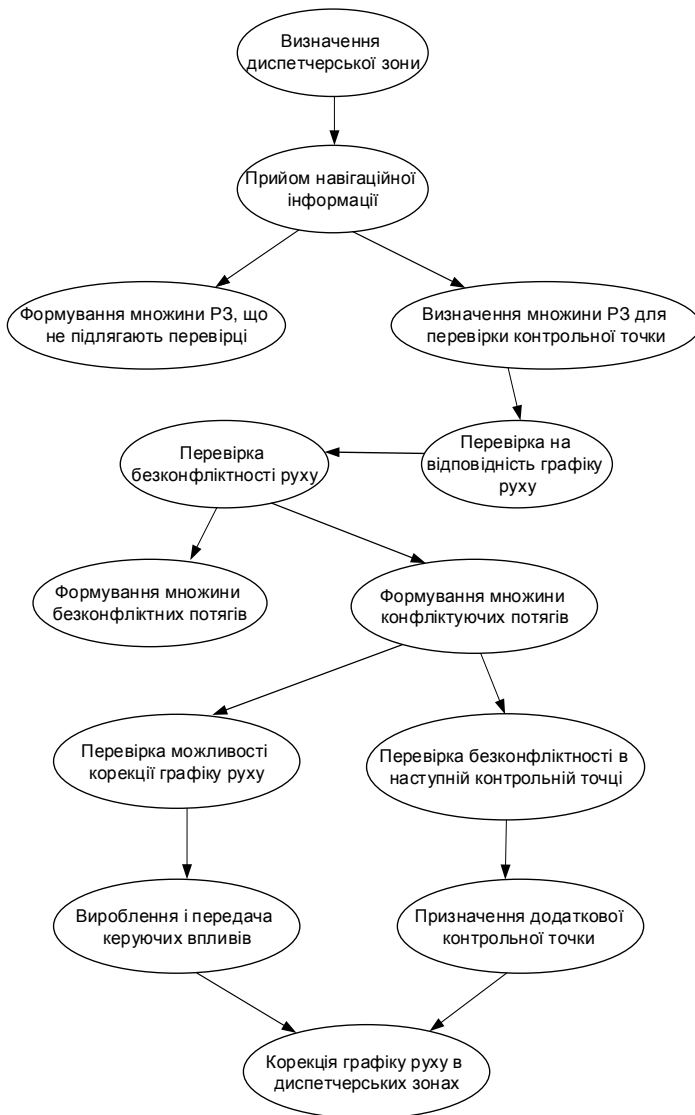


Рисунок 11 – Схема паралельного алгоритму корекції розкладу руху

Загальна схема алгоритму, що представлена на рис. 11, дозволяє початкову задачу диспетчеризації поділити на декілька задач меншої розмірності, вирішення яких здійснюється в паралельному режимі. Ефективність використання наведеним алгоритмом серверів при вирішенні задачі диспетчеризації визначається співвідношенням

$$E_p(n) = \frac{T_1(n)}{pT_p(n)} = \frac{S_p(n)}{p},$$

тобто величина ефективності визначає середню частку часу виконання алгоритму, впродовж якої сервери реально задіяні для вирішення задачі.

Таким чином, інформаційна технологія диспетчеризації об'єднує етапи прийому та обробки даних, контролю актуальності даних, пошуку РЗ, які знаходяться в ситуації порушення умов безпеки руху, визначення та впровадження компромісного впливу (рис. 12).

#### Четвертий розділ

присвячений проектуванню та реалізації інформаційної системи (ІС) диспетчеризації руху. Основні системні вимоги до ІС включають: здатність до перенесення, масштабованість, здатність до модифікацій, надійність, ефективність.

Для створення імітаційної моделі і програмної реалізації інформаційної системи диспетчеризації руху використано середовище AnyLogic, що має необхідний набір інструментальних засобів для моделювання дискретно-подієвих процесів і мультиагентних технологій. ІС диспетчеризації руху складається з множини агентів, які існують всередині агентного контейнера (рис. 13). Агенти взаємодіють через службу транспортування повідомлень на основі FIPA протоколу. Робота агентів координується та контролюється службою імен та сервісом авторизації. Каталог агентів є необхідним для інформування кожного агента про функції всіх агентів, які складають оточуюче середовище. Проміжні результати роботи агентів

зберігаються у кеш-пам'яті для уникнення чисельних запитів до бази даних, що уповільнює роботу системи в цілому.

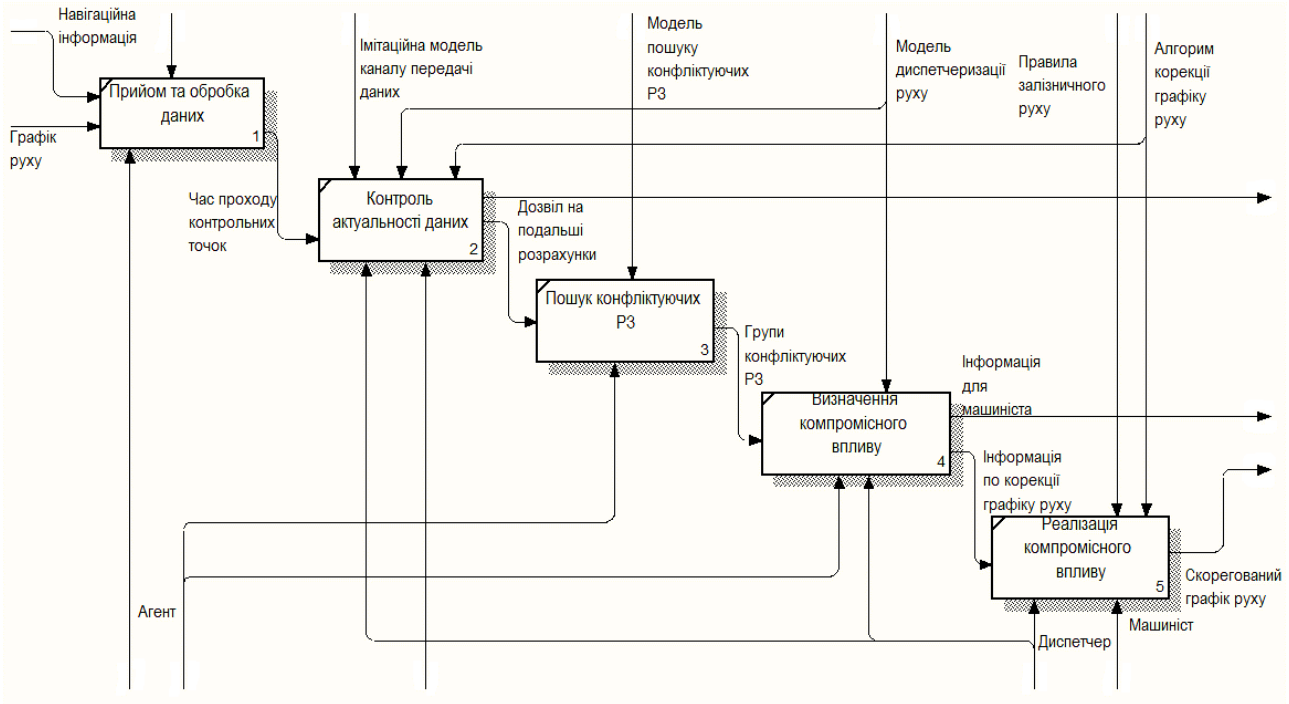


Рисунок 12 – Прикладна ІТ диспетчеризації руху

Апробацію роботи алгоритмів здійснено на двох прикладах з декількома перехрестями та місцями з одноколіїним рухом. Перший з них – типова залізнична карта зі світлофорами в усіх точках, в яких можливе виникнення ситуації порушення умов безпеки руху. Другий приклад – експериментальна модель з автоматизованою системою диспетчеризації руху на основі мультиагентних технологій.

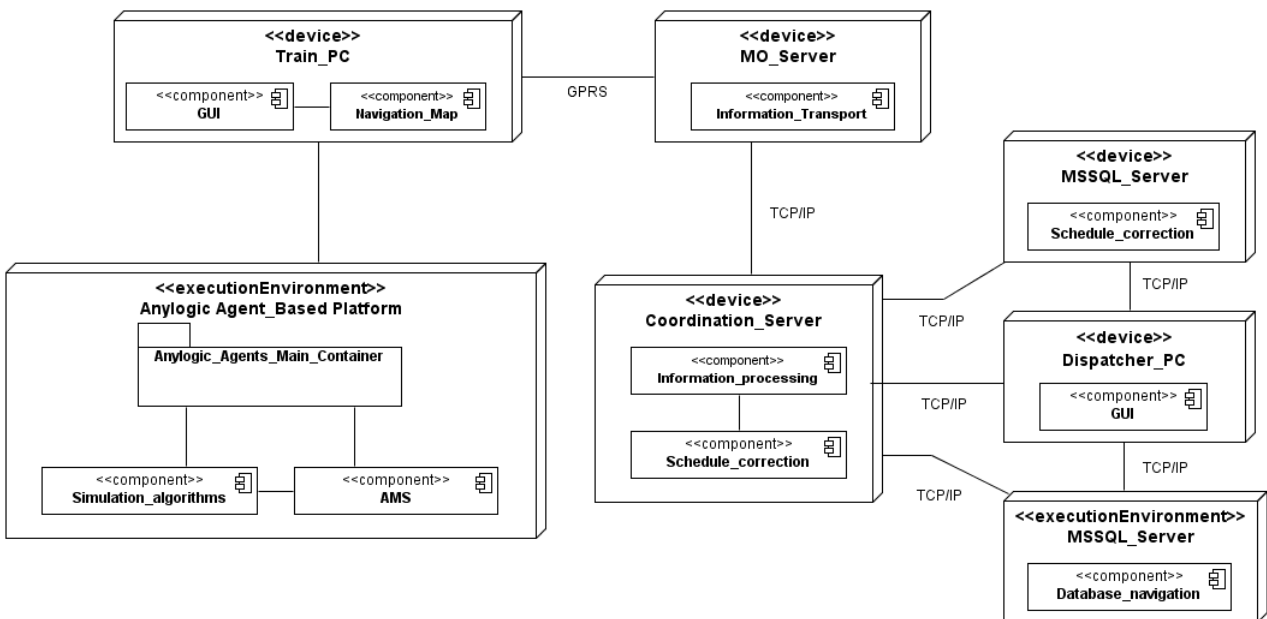


Рисунок 13 – Архітектура ІС диспетчеризації руху залізничного транспорту

Результати імітаційних експериментів показали, що ефект від застосування мультиагентного підходу (в порівнянні із звичайним залізничним рухом зі світлофорами) досягається за рахунок меншого часу простою РЗ на забороняючий сигнал світлофора. На рис. 14 представлений розподіл за часом перебування РЗ в системі, середнє значення якого 174,086 хвилини.

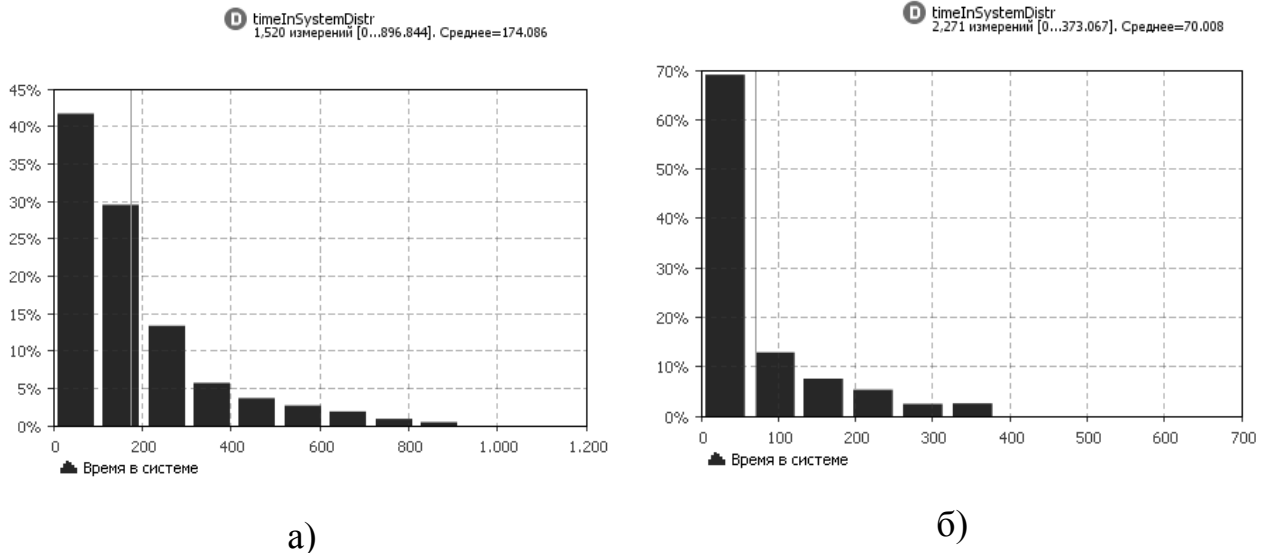


Рисунок 14 – Кількість РЗ в системі в різних часових інтервалах:

- а) – існуюче диспетчерське управління;  
 б) – інформаційна система диспетчеризації руху

За рахунок гнучкого перестроювання режиму роботи і застосування мультиагентних технологій приблизно в 2,5 рази вдалося скоротити середній загальний час перебування РЗ в системі за рахунок зниження інтервалу очікування на перехрестях в порівнянні зі звичайними світлофорними перехрестями з фіксованим часом перемикання (звичайні світлофорні перехрестя в AnyLogic моделювалися як автомати з кінцевим числом станів і фіксованим часом зміни стану). Середнє значення часу перебування в системі склало 70,008 хвилини.

На підставі побудованої імітаційної моделі виконано експеримент, в ході якого був розрахований час обробки даних та вироблення керуючого впливу агентами під час руху. Отримані дані були порівняні з максимально можливими значеннями часових показників для виконання умови актуальності. Наведений експеримент демонструє ефективність алгоритмів збору і обробки даних, а також вироблення керуючого впливу для вирішення ситуації порушення умов безпеки руху (рис. 15).

Таким чином, в цілому запропонована інформаційна технологія реалізації автоматизованої системи диспетчеризації руху дозволила підвищити рівень безпеки руху та ефективність перевезень, про що свідчить значно менший час перебування агентів в системі, графік максимально можливого і фактичного часу розробки управляючої дії, а також обробки отриманих даних.

Для оцінки економічної ефективності проекту були розраховані показники: чиста приведена вартість, рівень прибутковості, рентабельність активів, час передачі даних, надійність передачі даних, автоматизація праці, умови праці і безпека. Комплексну оцінку розраховано згідно з методикою послідовного агрегування класифікованих станів (ПАКС). Отримані оцінки підтвердили достатній рівень економічної ефективності впровадження.

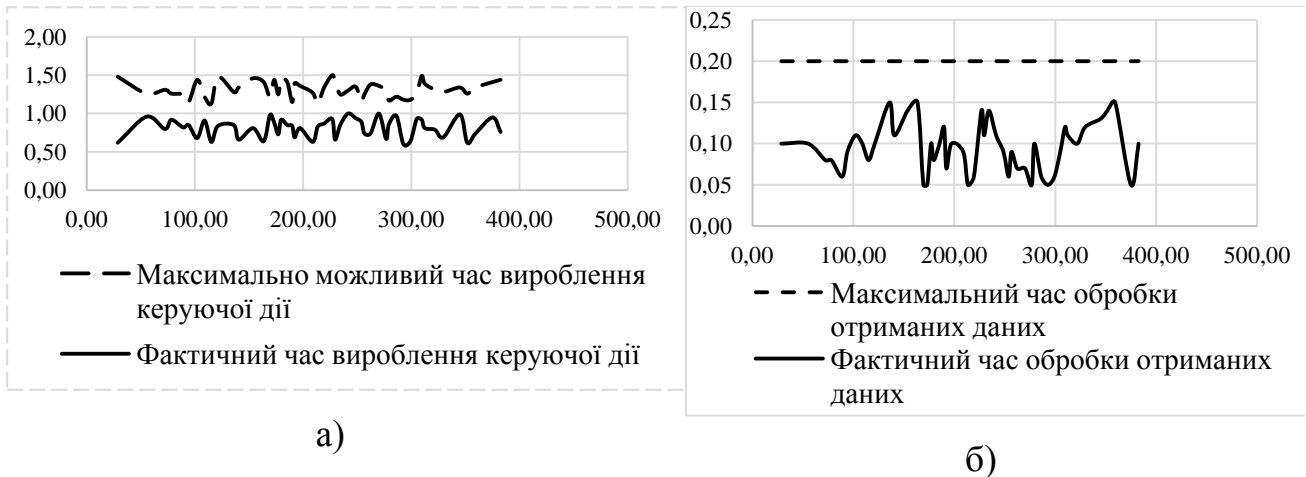


Рисунок 15 – Ілюстрація максимально можливого і фактичного часу:

а) – вироблення управляючої дії;

б) – обробки отриманих даних

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв’язана науково-практична задача підвищення безпеки руху та ефективності перевезень за рахунок мінімізації витрат на диспетчерське управління шляхом зниження часу обробки навігаційних даних та прийняття рішень на основі розробки моделей та інформаційної технології диспетчеризації залізничного транспорту. Проведені дослідження надали можливість отримати наступні наукові та практичні результати:

1. Проведено аналіз системи автоматизованого управління залізничним транспортом. Проаналізовано підходи та інформаційні технології, які використовуються в існуючих системах диспетчеризації залізниць. Проаналізовано можливості сучасних інформаційних технологій зв’язку і передачі даних для автоматизації диспетчерського управління. На основі проведеного аналізу поставлено задачу розробки моделей і методів процесів функціонування, передачі даних і диспетчеризації руху в умовах часових обмежень.

2. Розроблено комплексний підхід до вирішення задач диспетчерського управління для забезпечення високої ефективності перевезень і безпеки залізничного руху. Побудовано дворівневу ієрархічну систему із заданою інфраструктурою, яка дозволяє здійснити декомпозицію системи диспетчерського управління на окремі ділянки, що відповідають кількості залізниць в Україні, при урахуванні обмежень на інтервал часу актуальності вихідних даних. Виділено основні типи ситуацій порушення умов безпеки руху

і критерії оптимальності задачі диспетчеризації руху, які дозволяють отримувати відповідні рішення задачі диспетчеризації в залежності від встановленого пріоритету – безпеки руху, ефективності перевезень, витрат на управління.

3. Розроблено модель паралельної обробки даних, на основі якої алгоритм вирішення початкової задачі диспетчеризації поділено на окремі процеси, виконання яких здійснюється в паралельному режимі. Таким чином суттєво підвищена обчислювальна здатність алгоритмів та отримані результати рішення задачі диспетчеризації в умовах обмежень на час актуальності даних руху залізничного транспорту.

4. Розроблено імітаційну модель визначення пропускну здатності каналу передачі даних для вибору інформаційних технологій зв'язку і передачі даних, які використовуються при реалізації автоматизованої системи, що дозволяє постійно відстежувати стан каналу передачі даних і визначити необхідні інформаційні технології для його реалізації. Обґрунтованість використання GPRS як технології передачі даних підтверджується значеннями затримок в мережі, які для інтенсивностей надходження пакетів  $\frac{1}{10}$  і  $\frac{1}{20}$  дорівнюють 0,075 і 0,125, відповідно.

5. Розроблено модель паралельної обробки даних для вирішення задачі диспетчеризації з точки зору підвищення ефективності та оптимізації обчислювальної здатності алгоритмів для отримання результату за певний час. Проведені експерименти показали, що фактичний час обробки отриманих даних і розробки управляючого впливу знаходиться в межах допустимих значень і не перевищує час актуальності отриманих даних. Мінімальний запас за часом склав 13%, максимальний – 75%, що дозволяє в перспективі підвищити інтенсивність руху залізничного транспорту.

6. Розроблено комплексну інформаційну технологію на основі мультиагентного підходу для автоматизації процесу диспетчерського управління залізничним транспортом при вирішенні задачі диспетчеризації руху, яка дозволяє підвищити працездатність існуючої системи диспетчеризації. Для оцінки економічної ефективності проекту розраховані економічні та неекономічні показники. Комплексна оцінка розрахована згідно з методикою ПАКС (параметр 0,79).

7. Проведено апробацію інформаційної системи диспетчеризації на прикладі інтеграції в роботу диспетчерської служби Південної залізниці. Доведено ефективність використання розроблених моделей, алгоритмів і технологій. Отримані теоретичні та практичні результати впроваджені у діяльність ВП «Основ'янська колійно-машинна станція» регіональної філії «Південна залізниця» ПАТ «Українська залізниця» (м. Харків), ТОВ «Сайтос» (м. Харків) і інтегровані в навчальний процес на кафедрі програмної інженерії та інформаційних технологій управління НТУ «ХПІ».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Аркатов Д. Б. Постановка задачи «Разработка системы связи и передачи данных автоматизированной системы «Навигация и управление для железнодорожного транспорта Украины» / Д. Б. Аркатов, Ю. М. Борушко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – № 29. – С. 75–83.

*Здобувачем проведено аналіз сучасних систем автоматизації диспетчерського управління залізничним транспортом.*

2. Аркатов Д. Б. Задача координации движения подвижных средств / Д. Б. Аркатов // Системи обробки інформації. – Харків : ХУПС, 2012. – № 7 (105). – С. 40–43.

3. Аркатов Д. Б. Синтез моделей координации движения подвижных средств железнодорожного транспорта Украины / Д. Б. Аркатов // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків : Технологічний центр, 2012. – № 4/3 (58). – С. 58–60.

4. Аркатов Д. Б. Моделювання інформаційного обміну в системі координації руху залізничного транспорту / Д. Б. Аркатов // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. – Львів : ЛДУ БЖД, 2012. – № 6. – С. 15–22.

5. Аркатов Д. Б. Модели и методы автоматизации диспетчерского управления для железнодорожного транспорта Украины / Д. Б. Аркатов // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків : Технологічний центр, 2013. – № 1/10 (61). – С. 61–63.

6. Аркатов Д. Б. Модели декомпозиции и параллельной обработки данных автоматизированной системы координации движения подвижных средств / Д. Б. Аркатов // Проблеми інформаційних технологій. – Херсон : Херсонський національний технічний університет, 2012. – № 2 (012). – С. 22–28.

7. Аркатов Д. Б. Применение мультиагентных технологий в системе координации движения подвижных средств / Д. Б. Аркатов // Системи обробки інформації. – Харків : ХУПС, 2015. – № 9 (134). – С. 6–11.

8. Аркатов Д. Б. Разработка системы связи и передачи данных автоматизированной системы «Навигация и управление для железнодорожного транспорта Украины» / Д. Б. Аркатов // XX Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – С. 4.

9. Аркатов Д. Б. Информационные технологии системы связи и передачи данных автоматизированной системы для железнодорожного транспорта Украины / Д. Б. Аркатов // XIX Міжнародна конференція з автоматичного управління, 26-28 вересня 2012 року: матеріали конференції. – К : НУХТ, 2012. – С. 305-306.

10. Аркатов Д. Б. Критерии оптимальности системы координации движения подвижных средств / Д. Б. Аркатов // Тезиси докладов X Международной научно-практической конференции «Современные

информационные технологии в экономике и управлении предприятиями, программами и проектами». – Харків : НАУ «ХАІ», 2012. – С. 15–16.

11. Аркатов Д. Б. Оценка эффективности автоматизации диспетчерского управления на железнодорожном транспорте Украины / Д. Б. Аркатов // XXI Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – С. 4.

12. Arkatov D. B. A data transfer model of computer-aided vehicle traffic coordination system for the rail transport in Ukraine / D. B. Arkatov // Proceedings of the 9th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications: Integration, Harmonization and Knowledge Transfer (ICTERI 2013), Kherson, Ukraine, June 19-22, 2013. – pp. 178–186.

## АНОТАЦІЇ

**Аркатов Д. Б. Моделі та інформаційна технологія диспетчеризації руху для залізничного транспорту в умовах часових обмежень.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2016.

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача підвищення безпеки руху та ефективності перевезень за рахунок мінімізації витрат на диспетчерське управління шляхом зниження часу обробки навігаційних даних та прийняття рішень на основі розробки моделей та інформаційної технології диспетчеризації залізничного транспорту. Проведено аналіз основних проблем залізниці України, огляд її сучасного стану. Розроблено формальну модель задачі диспетчеризації руху, запропоновано класифікацію ситуацій порушення умов безпеки руху, які виникають під час руху залізничного транспорту. Розроблено схему інформаційного обміну системи диспетчеризації руху та імітаційну модель передачі навігаційних даних. Запропоновано схему функціонування підсистеми диспетчеризації руху, розроблено алгоритм визначення множини потягів, що знаходяться в ситуації порушення умов безпеки руху. Розроблено модель диспетчеризації руху диспетчерських зон в паралельному режимі та модель паралельної обробки даних, запропоновано алгоритм визначення ефективності паралельного алгоритму. Запропоновано формальне представлення мультиагентної системи диспетчеризації руху, розроблено алгоритм вирішення задачі диспетчеризації з використанням мультиагентного підходу. Представлено аналіз економічної ефективності використання інформаційної технології диспетчеризації руху в диспетчерському управлінні залізничного транспорту. Результати впроваджено у діяльність ВП «Основ'янська колійно-машинна станція» регіональної філії «Південна залізниця» ПАТ «Українська залізниця», ТОВ «Сайтосс», а також у навчальний процес кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління НТУ «ХПІ».

*Ключові слова:* інформаційна технологія, диспетчеризація руху,

імітаційна модель, залізничний транспорт, навігаційні дані, паралельна обробка, мультиагентний підхід.

**Аркатов Д. Б. Модели и информационная технология диспетчеризации движения для железнодорожного транспорта в условиях временных ограничений.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – информационные технологии. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2016.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-практической задачи повышения безопасности движения и эффективности перевозок за счет минимизации затрат на диспетчерское управление путем снижения времени обработки навигационных данных и принятие решений на основе разработки моделей и информационной технологии диспетчеризации железнодорожного транспорта. Исследованы современные системы автоматизированного управления в железнодорожном транспорте различных стран мира, а также существующие системы диспетчеризации железных дорог. Дано краткое описание железнодорожного транспорта Украины, его текущего состояния и перспектив. Сформулированы основные проблемы, существующие в железнодорожном транспорте Украины. Особое внимание уделено проблемам безопасности железнодорожного движения, информационной поддержки локомотивной бригады, эффективности грузовых и пассажирских перевозок, системе контроля параметров локомотива. Исследованы математические подходы к решению задачи диспетчеризации распределенных иерархических систем.

Построена модель информационного обмена, которая позволяет определить информационные технологии, используемые при реализации автоматизированной системы диспетчеризации движения. Построена формальная модель диспетчеризации движения, математическая модель диспетчеризации движения подвижных средств, дано формальное представление мультиагентной модели диспетчеризации. Приведены критерии оптимальности поставленной задачи: критерий бесконфликтного движения, критерий оптимизации перевозочного процесса, критерий, учитывающий затраты на управление. Описаны модели декомпозиции и параллельной обработки данных автоматизированной системы диспетчеризации движения, представлена модель передачи данных, используемая в системе диспетчеризации.

Произведен расчет пропускной способности канала передачи данных, который подтверждает правильность выбора технологии и оценки эффективности параллельного алгоритма. Разработана автоматизированная система диспетчеризации движения подвижных средств на основе мультиагентных технологий. Для создания имитационной модели и программной реализации алгоритмов, разработанных на основе формальных моделей диспетчеризации, использована среда AnyLogic.

Произведена оценка эффективности внедрения автоматизированной системы диспетчеризации движения в диспетчерское управление железнодорожным транспортом Украины. Определен экономический эффект от автоматизации и реформирования диспетчерского управления перевозками.

Осуществлено внедрение предложенных в диссертационной работе моделей и информационной технологии в процесс диспетчеризации и коррекции расписания движения ИП «Основьянская путейно-машинная станция-39» регионального филиала «Южная железная дорога» ПАО «Украинская железная дорога», ООО «Сайтосс», а также в учебный процесс кафедры программной инженерии и информационных технологий управления НТУ «ХПИ».

*Ключевые слова:* информационная технология, диспетчеризация движения, железнодорожный транспорт, навигационные данные, параллельная обработка, мультиагентный подход.

**Arkatov D. B. Models and information technology of railway traffic dispatching in terms of time constraints.** – As manuscript.

Thesis for a candidate degree in technical science, specialty 05.13.06 – Information Technologies. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2016.

In this thesis the topical scientific and practical problem is solved, which is improving road safety and transport efficiency by minimizing the costs of dispatching management by reducing the navigational data processing time and decision-making through the development of models and information technology of railway traffic dispatching. The main problems analysis of the railway Ukraine, a review of its current state is performed. Developed formal model of task scheduling motion classification conflicts that arise when driving railway transport. Developed the scheme of information exchange systems, scheduling the movement developed simulation model transfer navigation data. Developed the operation scheme of the subsystem dispatching movement algorithm determining a plurality of conflicting impulses. Developed the model of traffic scheduling dispatch zones in parallel mode, developed a model of parallel processing, an algorithm for determining the efficiency of the parallel algorithm. Invited a formal presentation of multi-agent scheduling system movement algorithm for solving the problem of scheduling using multi-agent approach. The analysis of the economic efficiency of the information technology use in the traffic scheduling dispatch management of railway transport is performed. The results are implemented in the process of scheduling and correction the regional branch «Ukrainian Railways» timetable, computer firm «Saytoss» and in the educational process of Computer-Aided Management Systems Department of NTU «KhPI».

*Keywords:* information technology, dispatch movement, railways, navigation data, parallel processing, multiagent approach.

