

УДК 621.391:681.518

**МОДЕЛЬ ДИСПЕТЧЕРСЬКОГО КЕРУВАННЯ ВЗАЄМОЗАЛЕЖНИМИ
ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ НА ПРОМИСЛОВОМУ ЗАЛІЗНИЧНОМУ
ТРАНСПОРТІ**

Кандидати техн. наук О. Ю. Каменєв, А. О. Лапко, асп. О. В. Щєблїкїна,
старші викладачі О. В. Лазарєв, М. В. Ушаков

**МОДЕЛЬ ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМОЗАВИСИМЫМИ
ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ
ТРАНСПОРТЕ**

Кандидаты техн. наук А. Ю. Каменев, А. О. Лапко, асп. Е. В. Щєблїкїна,
старшие преподаватели А. В. Лазарев, М. В. Ушаков

**MODEL OF MUTUALLY DEPENDENT TRANSPORT FLOWS TRAFIC CONTROL
ON INDUSTRIAL RAILWAY TRANSPORT**

PhD (Tech.) A. Kamenev, PhD (Tech.) A. Lapko, postgraduate student O. Shcheblykina,
senior lecturer O. Lazariiev, senior lecturer M. Ushakov

Досліджено питання, пов'язані з впровадженням інтелектуально-аналітичної підсистеми підтримки прийняття рішень у складі системи диспетчерського керування на промисловому залізничному транспорті. Запропоновано методи реалізації інтелектуально-аналітичного забезпечення диспетчерського керування рухом поїздів на промисловому залізничному транспорті, що використовують різні критерії оптимізації взаємозалежних транспортних потоків. Із використанням апарату теорії графів розроблено та запропоновано математичні моделі, що при своїй програмній реалізації забезпечують оптимальне керування перевезеннями технологічної сировини на промисловому комбінаті.

Ключові слова: комп'ютерна система, диспетчерське керування, транспортна задача, транспортний потік, метод оптимізації.

Исследованы вопросы, связанные с внедрением интеллектуально-аналитической подсистемы поддержки принятия решений в составе системы диспетчерского управления на промышленном железнодорожном транспорте. Предложены методы реализации интеллектуально-аналитического обеспечения диспетчерского управления движением поездов на промышленном железнодорожном транспорте, использующие различные критерии оптимизации взаимозависимых транспортных потоков. С использованием аппарата теории графов разработаны и предложены математические модели, которые при своей программной реализации обеспечивают оптимальное управление перевозками технологического сырья на промышленном комбинате.

Ключевые слова: компьютерная система, диспетчерское управление, транспортная задача, транспортный поток, метод оптимизации.

Issues related to the optimal control of interdependent traffic flows during the dispatching centralization of industrial railway transport facilities are investigated. The problem of the intellectual and analytical support of dispatch control and monitoring systems in industrial

transport is considered. Mathematical models have been developed for the optimal control of transport processes on industrial rail transport according to the criteria of maximizing the transported mass of goods and minimizing rolling mileage. Simulation modeling of the intellectual-analytical decision support system was carried out by the operational personnel of the centralized control room, on the basis of which a number of graphical dependencies of optimization parameters were obtained. A program implementation of the developed models with the purpose of their integration with dispatch centralization systems for the formation of recommendation actions to operational personnel is proposed. Identified ways to further research in the subject area. The adequacy of the proposed methods and models is confirmed by simulation. In particular, on the basis of modeling, graphical dependencies of the parameters of cargo flows on the coordinates of the rolling stock and the density of the commodity mass on the transport network of an industrial combine were obtained. The resulting graphical dependencies in their software implementation allow you to directly determine the best ways to manage the plant's traffic flows. The practical implementation of the methods, models and approaches proposed in the article consists in developing dispatching control and monitoring systems for industrial railway transport on their application software, which will provide recommendations on the optimal management of interdependent train traffic for the transportation of technological raw materials and goods.

Keywords: computer system, dispatch control, transport task, traffic flow, optimization method.

Вступ. Промисловий залізничний транспорт (ПЗТ) є важливою ланкою виробничо-технологічної мережі більшості підприємств важкої промисловості: металургійної, гірничо-збагачувальної, хімічної тощо. Безперервність і безвідмовність його роботи є необхідною умовою своєчасного та якісного виробітку основної продукції відповідних підприємств [1, 2].

Ефективність експлуатації ПЗТ суттєво підвищується при реалізації методів і засобів диспетчерського керування шляхом впровадження систем диспетчерської централізації (ДЦ), контролю (ДК) і пов'язаних з ними підсистем. Не дивлячись на те, що сучасні системи ДЦ і ДК реалізовані на мікропроцесорній елементній базі з програмною реалізацією логічних та інформаційних функцій, їхні функціональні можливості щодо оптимізації та раціоналізації керуючих задач залишаються на невисокому рівні. Це пов'язано перш за все з тим, що для мікропроцесорних систем ДЦ і ДК першого покоління відповідні функції прикладного програмного забезпечення (ПЗ) дублюють функції морально застарілих релейно-контактних

аналогів, доповнюючи їх лише певним розширеним сервісним забезпеченням (ранжуванням доступу, діалоговими повідомленнями тощо). Проте зазначені сервісні функції покликані лише частково полегшити працю оператора в частині людино-машинного інтерфейсу (ЛМІ), не будучи призначеними для надання йому допомоги в частині формування управлінських рішень [3-7].

У той же час функціональні можливості мікропроцесорної техніки та ПЗ надають можливості виконувати задачі транспортної оптимізації, тобто реалізації рекомендацій диспетчеру щодо найбільш раціонального використання транспортної мережі підприємства для доставки технологічного вантажу під цехи основного виробництва за різними критеріями (швидкість, пробіг рухомого складу, зменшення вартості доставки тощо). Такі рекомендації формуються на рівні інтелектуально-аналітичної системи (підсистеми) підтримки прийняття рішень (ІАС ППР) у складі ДЦ, що реалізується програмно на основі сформованих оптимізаційних моделей.

Таким чином, вдосконалення інтелектуально-аналітичного забезпечення систем диспетчерського керування (ДЦ-ДК) на промисловому транспорті полягає в розробленні математичних моделей і методів функціонування ІАС ППР, що реалізуються засобами прикладного ПЗ ДЦ-ДК.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемним питанням, пов'язаним з раціоналізацією функцій і вдосконаленням систем диспетчерського керування транспортними процесами, присвячено значну кількість наукових праць вітчизняних і закордонних науковців.

Зокрема в роботі [8] досліджено фактори, які впливають на якість диспетчерського керування перевізійним процесом залежно від координат профілю залізничної колії, що отримані засобами GPS. У якості критерію оптимізації диспетчерського керування в цій роботі встановлено мінімізацію ступеня нагріву буксових вузлів рухомого складу та мінімізацію гальмівних шляхів рухомих одиниць залежно від швидкостей руху, плану і профілю залізничної колії. Математичне розв'язання поставлених задач у роботі здійснюється з використанням апарату нечітких множин і нелінійних алгоритмів.

У роботі [9] запропоновано метод оптимізації транспортних процесів на ділянці, пов'язаний із динамічним моделюванням виконаних графіків руху. У якості критеріїв оптимізації розглянуто часові інтервали між поїздами, що відслідковуються різними засобами. Ефективність використання системи ДЦ при цьому оцінюється за функцією мінімізації сумарного значення зазначених інтервалів.

У роботі [10] розроблено метод оптимізації диспетчерського керування транспортними процесами з використанням лінійних алгоритмів, згідно з якими визначається субоптимальна дія на кожному керуючому етапі. Для розв'язання задач оптимізації в роботі застосована

матрична модель транспортних потоків, яка визначає співвідношення між вхідними, вихідними та внутрішніми змінними дискретного автомата, який відтворює динаміку функціонування транспортної мережі.

Методи оптимального керування транспортними потоками з використанням засобів ДЦ, нелінійних алгоритмів і способів визначення мінімальних траєкторій руху розглянуто в роботі [11]. Запропоновані методи використовують поліноміальні моделі нелінійної апроксимації траєкторій руху, відповідно до чого здійснюється чисельне порівняння їхніх довжин із вибором оптимальних маршрутів.

У роботі [12] запропоновано метод диспетчерського керування транспортними одиницями, що передбачає максимальне зближення між попутними потягами з мінімізацією їхнього пробігу на базі моделей критичного порівняння. У його основу закладено топологічне представлення транспортної мережі зі змінними (динамічними) параметрами елементів графічної моделі, тобто використовується ситуативна транспортна ситуація по кожній топологічній гілці для виконання раціональних керуючих дій.

Всі запропоновані в розглянутих роботах методи, моделі та засоби диспетчерського керування об'єднує єдиний принцип, який полягає в програмній їх реалізації на базі мікропроцесорних технічних засобів, і рекомендаційний характер керуючих впливів щодо оперативного персоналу ДЦ. Проте всі вони враховують виключно параметри оптимізації, пов'язані з рухом поїздів без характеристик технологічного вантажу та критичності його доставки до основних підрозділів виробництва.

Таким чином, світова наука щодо раціоналізації та оптимізації диспетчерського керування транспортними потоками враховує здебільшого потреби магістрального залізничного транспорту, у той час як особливості функціонування ПЗТ, що інтегрований у виробничо-технологічний

цикл промислового комбінату, залишаються недостатньо опрацьованими. Таким чином, виникає необхідність проведення науково-прикладного дослідження щодо формування оптимізаційної моделі функціонування ІАС ППР у складі ДЦ з керування поїзною роботою на коліях ПЗТ.

Визначення мети та задачі дослідження. Метою дослідження є розроблення методів інтелектуально-аналітичного забезпечення роботи ДЦ промислових комбінатів з позиції оптимального розподілу технологічного вантажу по основних виробничо-технологічних ланках в умовах взаємозалежних транспортних потоків. На їхніх результатах передбачається формування прикладного ПЗ систем ДЦ, що має виробляти оперативному персоналу рекомендаційні регулюючі дії через засоби ЛМІ.

Основна частина дослідження. Головним завданням будь-якого підприємства є мінімізація витрат і при цьому збільшення прибутку. Для вирішення цього завдання є багато методів, які використовуються на металургійних та інших заводах, одним з яких є зменшення собівартості шляхом оптимізації транспортних потоків засобами ДЦ. Отже, для оптимізації витрат на перевезення вантажної маси залізничним транспортом потрібно побудувати математичну модель транспортної мережі, яка буде описувати всі зв'язки та залежності в системі, іншими словами треба розв'язувати транспортну задачу. Щоб правильно відтворити всі взаємозв'язки, потрібно з'ясувати алгоритми та закони, за якими будуються даного роду задачі [13, 14].

Всі задачі оптимізації транспортних потоків можна розділити на два класи: задачі, у яких транспортні потоки вважаються незалежними, і задачі, у яких враховується взаємозв'язок транспортних потоків різноманітних видів. Перший клас задач вивчено достатньо докладно, і йому присвячена значна кількість робіт [8-11, 15, 16].

Проте принцип незалежності транспортних потоків не є характерним для ПЗТ, оскільки інтеграція перевезень у єдиний виробничо-технологічний цикл комбінату передбачає алгоритмізовану взаємопов'язану логіку та послідовність операцій з завантаження, вивантаження та доставки технологічного вантажу в основні цехи підприємства задля виробітку основної його продукції (металу, руди, коксохімічних матеріалів тощо). Таким чином, задача оптимізації диспетчерського керування засобами ПЗТ стосується саме другого класу відповідних задач.

Другим класом задач оптимізації транспортних потоків є задачі про взаємозалежні транспортні потоки, у яких додано умови, що відображують залежність розміру транспортного потоку одного виду, що протікає по якійсь ділянці (дузі) мережі, від розміру транспортних потоків інших видів, що протікають по цій же дузі, наприклад залежність потоку вантажів від потоку транспортних засобів, що здійснюють перевезення даних вантажів. Крім того, у цих задачах може враховуватися можливість перетворення транспортних потоків одного виду в інші. При взаємозалежних транспортних потоках математична модель більш точно описує реальний транспортний процес. Проте алгоритми розв'язання задач про взаємозалежні потоки значно складніше від алгоритмів для задач про незалежні потоки і потребують більш деталізованого опрацювання [15, 17, 18].

На практиці частіше за інші зустрічаються задачі, у яких потрібно оптимізувати два види взаємозалежних транспортних потоків: потік вантажів і потік різноманітних видів транспортних засобів, таких як вагони, локомотиви та спеціальний технологічний рухомий склад [19].

Задачі оптимізації вантажопотоків і потоків транспортних засобів можуть мати досить високу розмірність, особливо якщо йдеться про оптимальний розподіл

вантажопотоків між усіма видами транспорту. У цьому випадку доцільно використовувати не одну математичну модель, а ієрархічну систему взаємодіючих моделей, у якій модель верхнього рівня описує весь транспортний процес із використанням агрегованих показників, а моделі нижнього рівня дають детальний опис окремих складових цього процесу. Розв'язок, отриманий за допомогою агрегованої моделі, використовують для узгодження розв'язків детальних задач, а розв'язок детальних задач – для уточнення агрегованої моделі.

У ряді окремих випадків задачі про взаємозалежні потоки вдається зводити до задач про незалежні потоки, у які додано додаткові умови, що відображують у непрямій формі обмеження, накладені на потік іншого виду. Отже, для того щоб розв'язати задачу оптимізації взаємозалежних транспортних потоків, потрібно проаналізувати існуючі методи оптимізації незалежних транспортних потоків, розглянути всі можливі розв'язки транспортної задачі [20, 21].

Під назвою транспортна задача об'єднується широке коло задач з єдиною математичною моделлю. Дані задачі належать до задач лінійного програмування і можуть бути розв'язані відомим симплексним методом. Однак звичайна транспортна задача має велику кількість змінних і розв'язання її симплексним методом є громіздким, тому використання його в даному випадку є недоцільно. Також одним з найвідоміших методів при розв'язанні даних типів задач є використання графів, який і обраний у якості методу розв'язання поставленої задачі. У такому випадку моделлю залізничної транспортної мережі підприємства служить граф $G(K, A)$, множина вершин K якого являє собою транспортні вузли (станції, пости), а множина дуг A – ділянки шляхів переміщення транспортних потоків

(потоків рухомого складу, вантажів) із пунктів відправлення в пункти призначення. Вершини мережі відповідають пунктам завантаження та вивантаження продукції, складам для збереження вантажів і пунктам зосередження транспортних засобів. Дугам мережі приписані такі характеристики, як протяжність, пропускна спроможність, витрати на переміщення транспортних засобів і т. п. Якщо переміщення транспортних засобів між пунктами може відбуватися тільки в одному напрямку, дуга транспортної мережі називається орієнтованою, в іншому випадку – неорієнтованою [24, 25].

Для зображення вершин (або вузлів) орієнтованих і неорієнтованих дуг використовуються відповідно кружки, лінії зі стрілками і лінії без стрілок. У більшості випадків можна замінити одну неорієнтовану дугу двома орієнтованими і навпроти спрямованими дугами.

У загальному випадку транспортна мережа являє собою мультиграф (граф із декількома дугами між одною парою вершин), що містить цикли.

Приклад фрагмента мережі $G(K, A)$ наведено на рис. 1. Вершини, у яких зароджуються транспортні потоки, називаються «джерелами», а вершини, у яких вони поглинаються, – «стоками». Окремі об'єкти, що переміщуються, або «протікають», із пунктів зародження транспортних потоків у пункти їхнього поглинання, називаються «одинацями потоку». Надалі використовується символ $k_i \in K$ для позначення вершини $i = 1, \dots, n$ графа $G(K, A)$ і символ $(i, j) \in A$ для позначення орієнтованої дуги, що веде з k_i , до k_j . Упорядкована послідовність вершин і спрямованих дуг мережі $k_1 (1, 2), k_2 (2, 3), \dots, k_{n-1} (n-1, n), k_n$ така, що кінець попередньої дуги є початком наступної і називається шляхом (або маршрутом), що веде з вершини k_1 у вершину k_n .

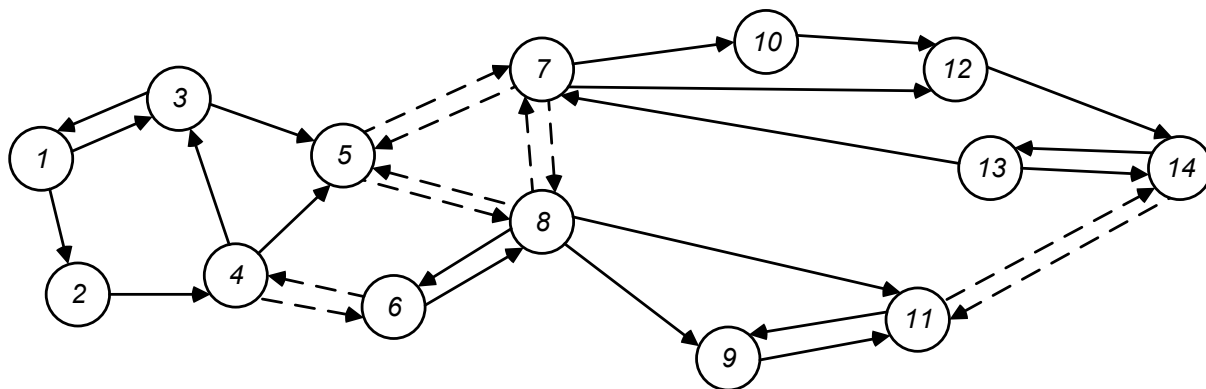


Рис. 1. Фрагмент графічної моделі транспортної мережі

При $k_l = k_n$ послідовність називається орієнтованим циклом або кільцевим маршрутом. Якщо будь-які дві вершини мережі можна з'єднати шляхом, то мережа називається зв'язаною. Якщо мережа не є зв'язаною, то її можна розбити на зв'язані підмережі або зв'язані компоненти. Прикладом незв'язаної транспортної мережі може служити підмережі шляхів сполучень річкового транспорту, що складається з декількох нез'єднаних річкових басейнів.

Для аналізованого планового періоду відомо кількість вантажу, що потрібно відправити або доставити в ті або інші вузли мережі $G(K, A)$. Перевезення вантажів здійснюється по дугах A мережі, пропускні спроможності яких обмежені. Вони вимірюються кількістю вантажу або транспортних засобів, що може бути переміщене по них у період планування. На дугах, що відповідають перевезенням, ці обмеження виникають внаслідок обмежених можливостей ділянок. Для кожної дуги мережі задано розміри, що виражають питомі грошові витрати і прибутки від перевезення одиниці вантажу відповідного роду визначеним видом транспорту. Якщо даний вантаж не може перевозитися по якійсь дузі, то вартість його перевезення дорівнює достатньо великому додатному числу, а прибуток від перевезення – достатньо великому від'ємному числу. Вважається також, що задані пропускні спроможності вузлів

транспортної мережі, що є наслідком обмеженої ємності складів і власної обмеженої можливості транспортного вузла з переробки транспортних засобів і вантажів промислового використання комбінату.

Одним із найбільш характерних прикладів сфери застосування задач про взаємозалежні потоки є планування перевезень, при якому необхідно оптимізувати декілька взаємозалежних потоків на транспортній мережі: потік вантажів, що доставляються від місця видобутку до виробничих підрозділів комбінату, потік контейнерів (або тари), потік локомотивів або буксирів, що рухають транспортні засоби, якщо вони не є самохідними.

У загальному випадку ці потоки не збігаються один з одним: як правило, вони зароджуються і поглинаються в різних вузлах транспортної мережі, при цьому деякі з них можуть існувати лише на визначених ділянках.

Незважаючи на те, що існування взаємозалежних потоків на транспортній мережі є об'єктивною реальністю, цей факт не знайшов явного відображення у відомих математичних моделях перевезень. У роботах, присвячених цій проблемі, або оптимізується один із потоків, або різноманітні потоки прямо чи опосередковано відображуються один з одним. У більшості робіт розглядається окремий випадок, коли потоки вантажів зафіксовані і задача планування перевезень

зводиться до задачі оптимального розподілу транспортних засобів по напрямках перевезень. Є більш загальні задачі, у яких наявність потоку вантажів враховується непрямым поданням шляхом виділення потоків навантажених і порожніх транспортних засобів [8-11].

Сформульована задача оптимізації двох взаємозалежних потоків на мережі полягає в такому: задано спрямований граф без петель $G(K, A)$, де K – множина вершин, A – множина дуг, що складається з \overline{M}

підграфів $G_1^M(K_1^M, A_1^M)$, зв'язаних загальними вершинами K_{01}^M .

По дугах графа можуть протікати два роди потоків: первинний і вторинний (рис. 2), що можна інтерпретувати, наприклад, як потік ресурсів і потік продукції, для виробництва якої вони використовуються, потік транспортних засобів і потік перевезених ними вантажів, потік носіїв інформації і потік переданої ним інформації.

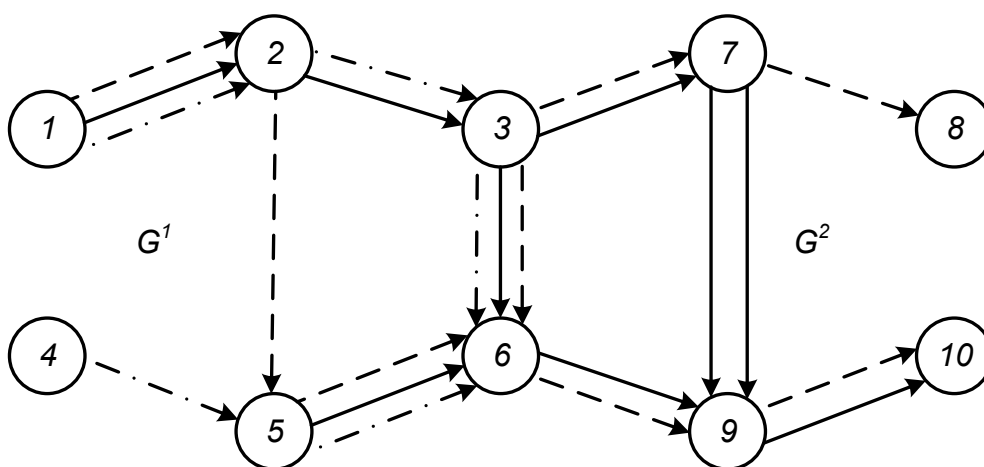


Рис. 2. Первинний і вторинний потоки

Потоки не є однорідними: на графі може існувати \overline{n} видів повторного потоку і \overline{m} типів первинного потоку. При цьому повторний потік може протікати від джерел до стоків будь-якими припустимими шляхами, тоді як кожний тип первинного потоку може існувати лише на визначеному підграфі G_1^M (відповідно до цього всі типи первинного потоку $1, \dots, \overline{m}$ розділені на групи $P_M, M = 1, \overline{M}$ невластивих типів).

Принциповою особливістю задачі, що відрізняє її від класичних задач про

багатопродуктові потоки, є наявність взаємозв'язку між потоками: для підтримки повторного потоку по дузі (i, j) , переміщення якого приносить «корисний ефект» («прибуток»), необхідно, щоб по ній протікав також первинний потік, що несе потік, переміщення якого пов'язано з визначеними «витратами».

Первинний потік ω_{ij}^m m -го типу по дузі $(i, j) \in A, M = 1, \overline{M}$ складається з потоків «активної» ϕ_{ij}^{mn} і «пасивної» φ_{ij}^{mn} складових:

$$\omega_{ij}^m = \sum_n \phi_{ij}^{mn} + \varphi_{ij}^{mn}, m \in P_M, (i, j) \in A_1^M, M = 1, \overline{M} \quad (1)$$

Розмір активної складової ϕ_{ij}^{mn} первинного потоку визначає розмір повторного потоку x_{ij}^{mn} по цій дузі, наявність пасивної складової ϕ_{ij}^{mn} обумовлена вимогою зберігання первинного потоку m -го виду.

Активна і пасивна складові формують, наприклад, кількість ресурсів, використовуваних при виконанні робіт, і кількість вільних ресурсів, що переміщуються з однієї роботи на іншу (зокрема кількість навантажених і порожніх транспортних засобів).

Залежність між первинним і повторним потоками виражається в тому, що розмір повторного потоку x_{ij}^{mn} по якійсь дузі (i, j) пропорційний активним складовим різноманітних типів первинного потоку, що протікають по дузі.

Залежність між первинним і повторним потоками не є взаємно однозначною:

1) той самий повторний потік може підтримуватися різноманітними комбінаціями активних складових різноманітних типів первинного потоку;

2) повторний потік може протікати від джерел до стоків будь-якими шляхами, тоді як кожний тип первинного потоку може існувати лише на визначеному підграфі;

3) у процесі свого переміщення від джерела до стоку повторний потік може підтримуватися різними типами первинного потоку, що міняються місцями в проміжних вершинах (наприклад на дузі (7, 2) (рис. 2) повторний потік підтримується активною складовою первинного потоку першого типу, а на дузі (2, 3) – активною складовою первинного потоку другого типу);

4) первинний потік може існувати й у тих дугах, у яких повторний потік відсутній (як, наприклад, у дузі (4, 5) на рис. 2).

Припускається лише часткове перетворення потоків різноманітних типів продуктів без їхнього посилення або ослаблення: відмінні від нуля і рівні

одиниці лише ті з коефіцієнтів перетворення, що зв'язують активну і пасивну складові того самого типу первинного потоку. Ці складові можуть переходити одне в одне у вершинах $i \in K_0^M$, наприклад на початку і по закінченні робіт (зокрема при навантаженні і розвантаженні потік порожніх транспортних засобів перетворюється в потік навантажених і навпаки) або при зміні одних ресурсів на інші. Задача полягає в знаходженні такої комбінації первинного і повторного потоків по дугах графа, яка забезпечує одержання максимального прибутку.

Також розглядається більш загальна задача про взаємозалежні потоки на мережі, у якій разом із невзаємозамінними і цілком взаємозамінними типами первинного потоку, що існують на підграфі і не перетинаються, розглядалися і частково взаємозамінні типи потоку, що існують на підграфах які мають загальні дуги. Незважаючи на свою специфічність, задачі такого роду мають цілий ряд різноманітних і важливих практичних застосувань. Вони виникають у сітковому плануванні і керуванні (коли разом із послідовністю виконуваних робіт враховуються і переміщення ресурсів), керовані виробництвом (коли оптимізується потік деталей або напівпродуктів, що проходять послідовне опрацювання, так і потік ресурсів, необхідних для цього опрацювання), керовані потоками інформації (коли розглядається як потік інформації, так і потік носіїв) і, як уже відзначалося, у плануванні роботи транспорту (коли разом із розподілом потоку вантажів по транспортній мережі оптимізуються переміщення транспортних засобів, що здійснюють перевезення цих вантажів).

Для того щоб більш наочно уявити особливості структури даної задачі, розглядається її окремий випадок, коли є лише один вид повторного потоку, а всі типи первинного потоку цілком

взаємозамінні. При цих умовах задача про два взаємозалежні потоки формулюється в такий спосіб:

$$\sum_{(i,j)} \left(c_{ij} x_{ij} - \sum_m \bar{c}_{ij}^{mn} \omega_{ij}^{mn} \right), \quad (2)$$

де c_{ij} , c_{ij}^{mn} – корисний ефект від переміщення одиниці повторного потоку і витрати на переміщення одиниці первинного потоку m -го типу $n = \overline{1, m}$ по дугах $(i, j) \in A$ графа при виконанні звичайних умов зберігання кожного з потоків, що проходять через вершину і граф.

$$\sum_{(j)} x_{ij} - \sum_{(j)} x_{ji} = \delta_i^I, i \in K, \quad (3)$$

$$\sum_{(j)} \omega_{ij}^{mn} - \sum_{(j)} \omega_{ij}^{mn} = \delta_i^{Im}, i \in K, m = \overline{1, m}, \quad (4)$$

$$\delta_i^{Im} = \begin{cases} \pm \gamma_{i\pm}^m, i \in K_{S\pm}^I \\ 0, i \notin K_{S\pm}^I \end{cases}, \quad (5)$$

$$\delta_i^I = \begin{cases} \pm \beta_{i\pm}^m, i \in K_{S\pm}^I \\ 0, i \notin K_{S\pm}^I \end{cases}, \quad (6)$$

де $\delta_i^{Im}, \delta_i^I$ – попит і пропозиції для первинного і повторного потоків;

$K_{S+}^I, K_{S-}^I, K_{S+}^I$ і K_{S-}^I – джерела і стоки для первинного і повторного потоків відповідно;

а також обмежень на пропускну спроможність дуг

$$\sum_m \omega_{ij}^{mn} \leq u_{ij}, (i, j) \in A \quad (7)$$

і особливих обмежень, що відображують розподіл первинного потоку на активну і пасивну складові:

$$\omega_{ij}^m = \phi_{ij}^{mn} + \varphi_{ij}^{mn}, (i, j) \in A, m = \overline{1, m}, \quad (8)$$

і залежність повторного потоку від активних складових різноманітних типів первинного потоку, що забезпечує

транспортно-експедиторську діяльність на комбінаті:

$$x_{ij} = \sum_m b^m \phi_{ij}^m, (i, j) \in A. \quad (9)$$

Як бачимо, основною особливістю, що відрізняє дану задачу від звичайних задач про багатопродуктові потоки мінімальної вартості, є наявність специфічних обмежень (8), (9), що визначаються апроксиматичними відмінностями потяга:

$$x_{ij}, \phi_{ij}^m, \varphi_{ij}^m \geq 0, (i, j) \in A, m = \overline{1, m}. \quad (10)$$

Розглянута задача може бути зведена до традиційних задач про потоки в мережах лише в деяких окремих випадках. Однією з найбільш істотних умов для цього є виконання вимоги, щоб перетворення

активної складової в пасивну й навпаки відбувалося тільки в джерелах і стоках $K_{S\pm}^I$ для повторного потоку і не припускалася передача повторного потоку від ресурсів одного типу до ресурсів іншого типу, тобто щоб розмір активної складової первинного потоку (потоку ресурсів), що підтримує повторний потік від джерела до стоку, залишався незмінним.

У цьому випадку умови зберігання повторного потоку еквівалентні умовам зберігання активної складової первинного потоку, що дає можливість не розглядати повторний потік у явному вигляді. Якщо в мережі існує лише один тип первинного потоку ($\bar{m} = 1$), то задача зводиться до звичайної задачі про двопродуктовий потік ϕ і φ :

$$\begin{aligned} & \sum_{(i,j)} [(c_{ij} - c_{ij}^*)\phi_{ij} - \tilde{c}_{ij}^* \varphi_{ij}] \rightarrow \max, \\ & \sum_j \phi_{ji} - \sum_j \phi_{ij} = \frac{1}{b} \delta_i^H, i \in K, \\ & \sum_j \varphi_{ji} - \sum_j \varphi_{ij} = \delta_i^r - \frac{1}{b} \delta_i^H, i \in K, \\ & \phi_{ij} + \varphi_{ij} \leq u_{ij}, (i, j) \in A, \\ & \phi_{ij} \geq 0, \varphi_{ij} \geq 0, (i, j) \in A. \end{aligned} \quad (11)$$

В ідеальному випадку, коли пасивна складова φ відсутня (тобто первинний потік цілком використовується для підтримки повторного потоку) або може бути задана априорно, аналізована задача ще більш спрощується і переходить у задачу про однопродуктовий потік ϕ мінімальної вартості.

Не менш важливим є організація з використанням ДЦ взаємодії різних видів промислового транспорту на комбінаті – автомобільного і залізничного. Для цього розв'язується задача планування перевезень декількома видами транспорту. Основним напрямком підвищення ефективності роботи транспорту є поліпшення взаємодії різноманітних його

видів із метою оптимального використання наявних ресурсів.

У зв'язку з цим однією з найважливіших практичних задач є комплексне планування перевезень вантажів різноманітними видами транспорту (автомобільним, залізничним і т. д.). Оскільки ця задача полягає, з одного боку, у виборі шляхів доставки вантажів і розподілі вантажопотоків по транспортних мережах окремих видів транспорту, а з іншого боку, у виборі типів використовуваних транспортних засобів (автомобілів, вагонів і т. п.) і їхніх переміщень при виконанні перевезень, для її розв'язання можуть бути використані моделі оптимізації двох взаємозалежних потоків: потоку вантажів (повторного потоку) і потоку транспортних засобів (первинного потоку), що складається з двох складових: потоку навантажених транспортних засобів (активна складова) і потоку порожніх транспортних засобів (пасивна складова). Взаємозв'язок потоків вантажів і транспортних засобів виражається в залежності розміру потоку вантажів від розміру потоку навантажених транспортних засобів і в тому, що в пунктах навантаження-розвантаження потоки навантажених і порожніх транспортних засобів переходять один в один, а в пунктах перевалювання потік транспортних засобів одного виду транспорту переходить у потік транспортних засобів іншого виду транспорту.

Дослідивши задачі оптимізації взаємозалежних транспортних потоків, було зроблено висновок, що розв'язання транспортної задачі, а саме розподіл транспортних потоків у системі, є процесом громіздким і виходить за рамки даного дослідження, тому буде наведена модель ефективності впровадження даного проекту, якщо вважати, що модель розподілу транспортних потоків побудована та впроваджена з максимальним ефектом.

Розглянувши вирази можливих варіантів оптимізації взаємозалежних транспортних потоків, можна зробити висновок, що від оптимального розподілу потоків у мережі буде залежати щільність вантажопотоку та маса видобутку відповідно.

Система описується такими локальними параметрами: вхідними (довжиною шляху транспортування, часом транспортування – це дані, що збираються автоматично з обладнання) і вихідними (масою що переміщується, щільністю вантажопотоку та прибутком).

Для опису системи в цілому введемо залишкову функцію вантажопотоків – Δ_k на обраному рівні як

$$\sum M_i - \sum m_j = \Delta_k, \quad (12)$$

де M_i – вхідний вантажопотік;

m_j – вихідний вантажопотік.

При цьому можна вважати, що буде справедливим таке співвідношення:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + v * grad\rho, \quad (13)$$

де ρ – щільність вантажопотоку;

v – швидкість переміщення вантажу у вантажопотоці.

Вираз (13) можна записати в іншому вигляді:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + v * \left(\frac{\partial\rho}{\partial x} + \frac{\partial\rho}{\partial y} + \frac{\partial\rho}{\partial z} \right). \quad (14)$$

Або для одномірного випадку

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + v * \left(\frac{\partial\rho}{\partial x} \right). \quad (15)$$

В одномірному випадку можна одержати значення швидкості як

$$v = \frac{\frac{d\rho}{dt} - \frac{\partial\rho}{\partial t}}{\frac{\partial\rho}{\partial x}}, \quad (16)$$

де під v розуміється компонента швидкості в цьому ж напрямку.

Крім того, необхідно прийняти таке припущення, що буде справедливим співвідношення для цінового потенціалу Δ_c

$$\Delta_c = -b * \rho, \quad (17)$$

де b – коефіцієнт пропорційності.

Це співвідношення говорить про те, що вантажопотік потенційний.

Причому значення Δ_c може являти собою як ціновий потенціал, так і потенціал організаційного типу.

У двомірному випадку можна зазначити, що справедливе співвідношення

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} = -b * \rho. \quad (18)$$

При одному вимірі одержимо

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = -b * \rho. \quad (19)$$

У результаті справедливим буде вираз

$$\rho = -\left(\frac{1}{b}\right) * \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (20)$$

де значення $\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$ може бути заздалегідь задане у вигляді функції або виразу.

Залежність щільності вантажопотоку від відстані від центру завантаження вантажної маси наведена на рис. 3. Даний графік показує, що чим далі від центру завантаження знаходяться транспортні засоби, тим менша щільність вантажопотоку.

У свою чергу графік зміни швидкості вантажопотоку відповідно до виразів (15)–(20) набуде вигляду, показаному на рис. 4.

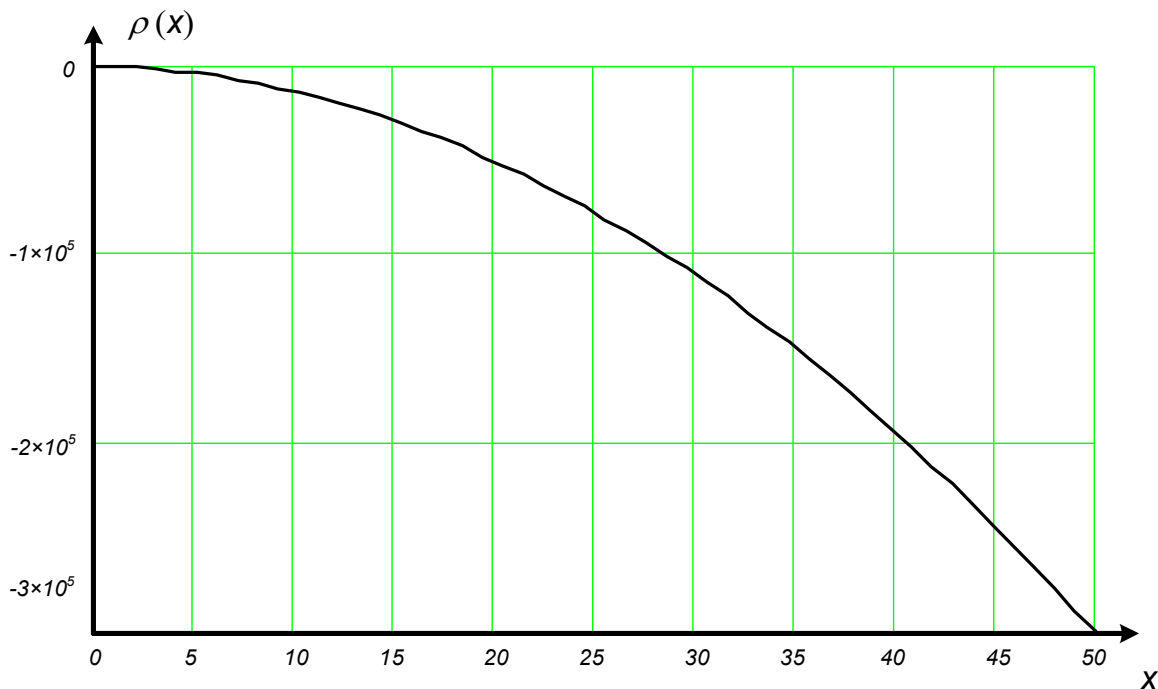


Рис. 3. Залежність щільності $\rho(x)$ від відстані:

$\rho(x)$ – щільність вантажопотоку (т/год); x – відстань від центру завантаження (км)

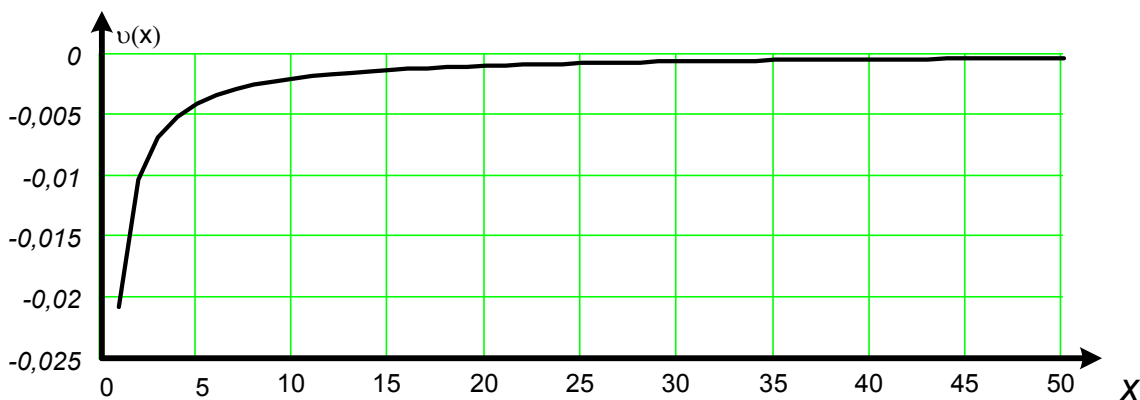


Рис. 4. Графік, що фіксує зміну швидкості вантажопотоку v залежно від координати x :

$v(x)$ – швидкість вантажопотоку, км/год; x – відстань від центру завантаження, км

Даний графік наочно відображує, що чим далі від центру завантаження розташовані транспортні засоби, тим швидше відбуваються перевезення, оскільки на шляху відбувається розвантаження і швидкість зростає.

Функція швидкості асимптотична і швидко досягає свого граничного значення.

Залежність маси вантажу від його цінового потенціалу відповідно до виразів (15)–(20) наведена на рис. 5.

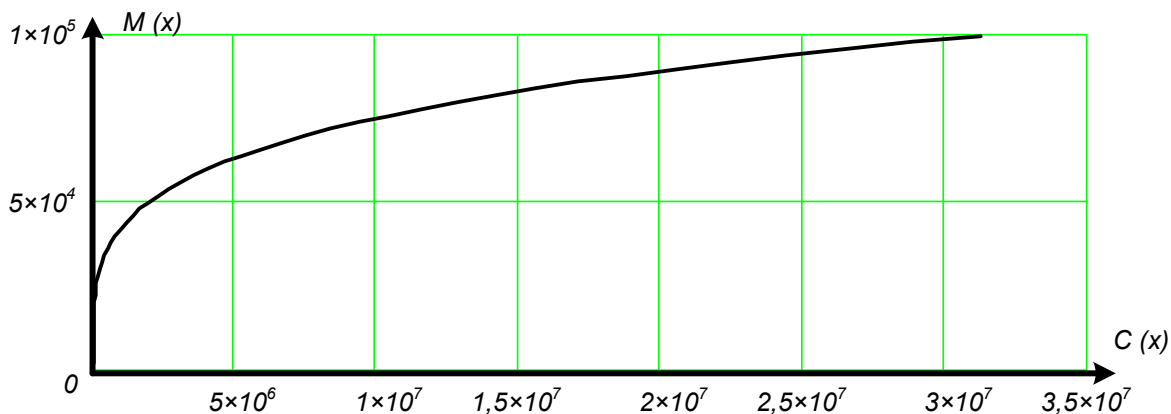


Рис. 5. Залежність розміру вантажопотоку від цінового потенціалу:
 $M(x)$ – маса вантажу, т; $C(x)$ – ціновий потенціал, умов. од.

Слід зазначити, що в реальних умовах швидкість переміщення будь-якого вантажу буде обмежена.

З графіка на рис. 5 можна зробити висновок, що зі збільшенням вантажопотоку зростає ціновий потенціал зразка транспортного призначення на ділянці залізничного транспорту.

Проте розв'язання рівняння (20), назване звичайним диференціальним рівнянням фізики, викликає достатньо багато труднощів, можливість розв'язання рівнянь подібного типу пов'язано з можливістю поділу змінних у спеціально обраних системах координат.

Більш реально для пошуку розв'язання обмежитися одномірним випадком або застосувати, як варіант, диференціювання по шляху.

Інший варіант рішення полягає в тому, щоб задаватися простим виразом, наприклад для $\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$, і потім знаходити розв'язок для ρ з рівняння (16).

Проте підходом до розв'язання може бути таке значення ρ , що знаходиться з рівняння (16), після чого цей вираз підставляється у відповідні рівняння, що після ряду перетворень дозволяє одержати значення швидкості v реального вантажопотоку.

Крім того, відомо, що щільність вантажопотоку можна знайти з виразу

$$\rho(x, t) = m_o \int n^\phi(x, p, t) dp, \quad (21)$$

де $n^\phi(x, p, t)$ – фазова щільність;
 p – імпульс вантажу в потоці.

Імпульс вантажу у вантажопотоці

$$p = m_o * \mathcal{X}, \quad (22)$$

де m_o – маса вантажу;
 \mathcal{X} – швидкість вантажу.

А масу вантажу, що проходить по вантажопотоку, можна визначити як

$$M_i(m_j) = m_o \iint n^\phi(x, p, t) dp. \quad (23)$$

У цьому випадку, у загальному вигляді, ми маємо весь комплект рівнянь для визначення маси вантажопотоку і його щільності:

$$\begin{cases} \rho(x, t) = m_o \int n^\phi(x, p, t) dp \\ M_i(m_j) = m_o \iint n^\phi(x, p, t) dp \end{cases}$$

Після математичного моделювання отримаємо

$$M_{n_1, i} := \sum_{l=1}^{n_1} \left[(-1)^{l+1} \cdot \frac{n_1! \cdot (p_i)^l}{l! (n_1 - l)!} \right] p_i := \frac{i}{10} \quad i := 1, 2 \dots 10 \quad \underline{w} := 1 \dots 30 \quad n_1 := 1$$

Після того як було знайдено масу та щільність вантажу, можна підрахувати прибуток за формулою

$$P = C_{iz}^n \cdot M - C_{iz}^{mn} \cdot M, \quad (24)$$

де C_{iz}^n – ціна за 1 т технологічного вантажу;

C_{iz}^{mn} – собівартість за 1 т технологічного вантажу;

M – маса видобутку за 1 добу.

Сформований відповідно до виразів (15)-(24) поверхневий графік залежності вантажної маси від її щільності та віддаленості від пункту призначення наведено на рис. 6.

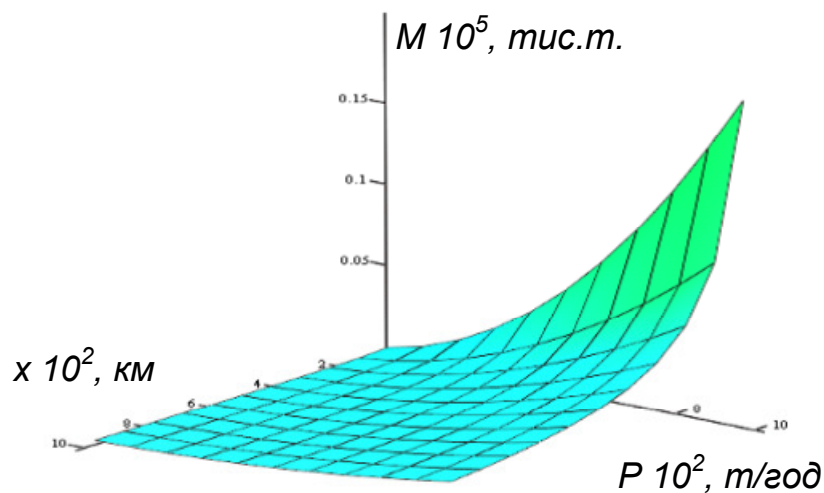


Рис. 6. Поверхневий графік залежності маси вантажу від його щільності та від координати віддалення від пункту завантаження

Отримана залежність і вирази, на підставі яких вона була сформована, при програмній реалізації дозволяють впровадити до складу ІАС ППР ДЦ функції з надання рекомендацій оперативному персоналу щодо оптимального розподілу завантаженого рухомого складу по транспортній мережі комбінату.

Висновки. Розроблене і вдосконалене інтелектуально-аналітичне забезпечення комп'ютерної системи ДЦ ПЗТ базується на використанні задачі оптимізації взаємозалежних транспортних потоків.

Відповідно до критерію, що встановлює максимальне ущільнення вантажної маси технологічного вантажу при мінімальному пробігу рухомого складу, розроблено математичні моделі, що реалізують у складі прикладного ПЗ системи ДЦ інтегровану в неї ІАС ППР, яка згідно з рекомендаційними впливами дозволяє оптимізувати процес керування перевезеннями технологічного вантажу на комбінаті.

Проте в дослідженні не враховано, що окремі транспортні потоки на комбінаті

можуть бути незалежними. Таким чином, подальший розвиток у даному напрямі полягає в опрацюванні незалежних транспортних потоків з подальшою

інтеграцією отриманих математичних моделей у складі ІАС ППР системи ДЦ на лініях ПЗТ.

Список використаних джерел

1. Полякова, О. М. Логістичний підхід до взаємодії магістрального і промислового залізничного транспорту [Текст] / О. М. Полякова // Вісник економіки транспорту і промисловості. – Харків : УкрДУЗТ, 2015. – Вип. 49. – С. 199-203.
2. Campos, J. Rail Transport Regulation [Text] / J. Campos, P. Cantos. – Washington D.C.: Economic Development Institute of the World Bank, 2017. – 66 p.
3. Corman, F. Real-time Railway Traffic Management: dispatching in complex, large and busy railway networks [Text] / F. Corman. – TRAIL Thesis Series T2010/14, the Netherlands TRAIL Research School, 2010. – 212 p.
4. Miao, Y. Research on Centralized Dispatching System of Rail Transit [Text] / Y. Miao // 2018 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS). – Xiamen, Fujian, China, 2018. – P. 34-37.
5. Krasemann, J. Computational decision-support for railway traffic management and associated configuration challenges: An experimental study [Text] / J. Krasemann // Journal of Rail Transport Planning & Management. – 2015. – Vol. 5. – № 3. – P. 95-109.
6. Удосконалення диспетчерського керівництва дільниці на основі прогностичного моделювання перевізного процесу [Текст] / П. В. Долгополов, Т. В. Головка, Т. В. Галишинець [та ін.] // Вісник НТУ «ХПІ». – 2015. – Вип. 49(1158). – С. 36–39.
7. Мікропроцесорна диспетчерська централізація «КАСКАД» [Текст] : навч. посібник / М. І. Данько, В. І. Мойсеєнко, В. З. Рахматов [та ін.]. – Харків : УкрДАЗТ, 2005. – 48 с.
8. Liudvinavičius, L. New possibilities of railway traffic control systems [Text] / L. Liudvinavičius, S. Dailydka, A. Sladkowski // Transport Problems. – 2016. – Vol. 11. – Iss. 2. – P. 133-142.
9. Kara, T. Design and Simulation of a Decentralized Railway Traffic Control System [Text] / T. Kara, M. Cengiz Savaş // Engineering, Technology & Applied Science Research. – 2016. – Vol. 6. – No. 2. – P. 945-951.
10. Distributed optimization for real-time railway traffic management [Text] / X. Luan, B. D. Schutter, T. Boom [and oth.] // IFAC PapersOnLine 51-9. – 2018. – P. 106-111.
11. Ajanovi'c, Z. A novel model-based heuristic for energy-optimal motion planning for automated driving [Text] / Z. Ajanovi'c, M. Stolz, M. Horn // IFAC PapersOnLine 51-9. – 2018. – P. 255-260.
12. Rupp, A. Decentralized Cooperative Merging using Sliding Mode Control [Text] / A. Rupp, M. Stolz, M. Horn // IFAC PapersOnLine 51-9. – 2018. – P. 349-354.
13. Білявський, В. М. Організація системи диспетчеризації операційної діяльності підприємств [Текст] / В. М. Білявський // Вісник Львівської комерційної академії. – 2014. – № 45. – С. 27–32.
14. Калінін, О. В. Операційний менеджмент якості на підприємствах в межах реалізації його інноваційного розвитку [Текст] / О. В. Калінін // Теоретичні і практичні аспекти економіки та інтелектуальної власності. – 2013. – Вип. 2 (1). – С. 218–224.
15. Rota, B. Traffic Flow Optimization on Freeways [Text] / B. Rota, M. Simic // Procedia Computer Science. – 2016. – Vol. 96. – P. 1637-1646.

16. BotMiner: Clustering Analysis of Network Traffic for Protocol- and Structure-Independent Botnet Detection [Text] / G. Gu, R. Perdisci, J. Zhang [and oth.] // USENIX Association. 17th USENIX Security Symposium. – 2008. – P. 139-154.
17. Loiseau, P. A Long-Range Dependent Model for Network Traffic with Flow-Scale Correlations [Text] / P. Loiseau, P. Primet, P. Gonçalves // Stochastic Models. – 2011. – Vol. 27. – Iss. 2. – P. 333-361.
18. Cremer, M. A fast simulation model for traffic flow on the basis of Boolean operations [Text] / M. Cremer, J. Ludvig // Mathematical Computer Simulation – 1986. – Vol. 28. – P. 297–303.
19. Скалозуб, В. В. Многокритериальные модели задачи анализа транспортных сетей с учетом специализированных свойств носителей потоков [Текст] / В. В. Скалозуб, Л. А. Паник // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 4. – С. 15-21.
20. Гюльштейн, Е. Г. Задачи линейного программирования транспортного типа [Текст] : учеб. для вузов / Е. Г. Гюльштейн, Д. Б. Юдин. – М. : Наука, 1969. – 384 с.
21. Жалак, М. І. Основи теорії і методів оптимізації [Текст] : навч. посібник / М. І. Жалак, Ю. В. Триус. – Черкаси : Брама-Україна, 2005. – 608 с.
22. Кустов, В. Ф. Экспериментально-статические модели распределённых технологических объектов [Текст] / В. Ф. Кустов, А. Ю. Каменев // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 2. – С. 97-101.
23. Development and investigation of methods of graphic-functional modeling of distribute systems [Text] / A. Boinik, O. Kameniev, A. Lapko [and oth.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technolo-gies. – Kharkov: Tech-nology Center, 2018. – № 4/4(94). – P. 59-69.
24. Каменев, О. Ю. Варіанти організації диспетчерського контролю об'єктів залізничної транспортної мережі [Текст] / О. Ю. Каменев // Проблеми економіки та управління на залізничному транспорті – ЭКУЗТ-2015: матеріали Х Ювілейної МНПК, 30 червня – 1 липня 2015 р., м. Одеса. – К. : ДЕТУТ, 2015. – С.64-65.
25. Сигорский, В. П. Математический аппарат инженера [Текст] / В. П. Сигорский. – 2-е изд., стереотип. – К. : Техника, 1977. – 768 с.

Каменев Александр Юрійович, канд. техн. наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-32.

E-mail: alexstein@kart.edu.ua.

Лапко Антон Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-32.

E-mail: a.o.lapko@kart.edu.ua.

Щебликіна Олена Вікторівна, аспірант кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-32. E-mail: sov@kart.edu.ua.

Лазарев Олексій Владленович, старший викладач кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-32.

E-mail: lazal@kart.edu.ua.

Ушаков Михайло Віталійович, старший викладач кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-32.

E-mail: micush@kart.edu.ua.

Каменев Александр Юрьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и компьютерного телеуправления движением поездов Украинского государственного университета железнодорожного транспорта.

Тел.: (057) 730-10-32. E-mail: alexstein@kart.edu.ua.

Лапко Антон Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и компьютерного телеуправления движением поездов Украинского государственного университета железнодорожного транспорта.

Тел.: (057) 730-10-32. E-mail: a.o.lapko@kart.edu.ua.

Щеблыкина Елена Викторовна, аспирант кафедры автоматики и компьютерного телеуправления движением поездов Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (057) 730-10-32.

E-mail: sov@kart.edu.ua.

Лазарев Алексей Владленович, старший преподаватель кафедры автоматизации и компьютерного телеуправления движением поездов Украинского государственного университета железнодорожного транспорта.

Тел.: (057) 730-10-32. E-mail: lazal@kart.edu.ua.

Ушаков Михаил Витальевич, старший преподаватель кафедры автоматизации и компьютерного телеуправления движением поездов Украинского государственного университета железнодорожного транспорта

Тел.: (057) 730-10-32. E-mail: micush@kart.edu.ua.

Kameniev Oleksandr Jurijovych, PhD (Tech.), associate professor, Department of Automatic and Computer Remote Control of Train Traffic, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-32.

E-mail: alexstein@kart.edu.ua.

Lapko Anton Oleksandrovych, PhD (Tech.), associate professor, Department of Automatic and Computer Remote Control of Train Traffic, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-32.

E-mail: a.o.lapko@kart.edu.ua.

Shcheblykina Olena Viktorivna, postgraduate student, Department of Automatic and Computer Remote Control of Train Traffic, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-32. E-mail: sov@kart.edu.ua.

Lazariev Oleksii Vladlenovych, senior lecturer, Department of Automatic and Computer Remote Control of Train Traffic, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-32. E-mail: lazal@kart.edu.ua.

Ushakov Mychailo Vitalijovych, senior lecturer, Department of Automatic and Computer Remote Control of Train Traffic, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-32. E-mail: micush@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 28.12.2018 р.