

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет залізничного транспорту

ПРОХОРЧЕНКО АНДРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 656.22

**ФОРМУВАННЯ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ РОЗПОДІЛОМ ПРОПУСКНОЇ
СПРОМОЖНОСТІ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ В УМОВАХ
НЕДИСКРИМІНАЦІЙНОГО ДОСТУПУ**

05.22.01 – транспортні системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків - 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор
Бутько Тетяна Василівна,
Український державний університет залізничного транспорту, кафедра управління експлуатаційною роботою, завідувач кафедри.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Губенко Володимир Костянтинович,
Приазовський державний технічний університет, кафедра технологій міжнародних перевезень і логістики, завідувач кафедри;

доктор технічних наук, професор
Жуковицький Ігор Володимирович,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка Всеволода Лазаряна, кафедра електронних обчислювальних машин, завідувач кафедри;

доктор технічних наук, професор
Чернецька-Білецька Наталія Борисівна,
Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, кафедра логістичного управління та безпеки руху на транспорті, завідувач кафедри.

Захист відбудеться “___” _____ 2016 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.04 в Українському державному університеті залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

Автореферат розісланий “___” _____ 2016 р.

В.о. ученого секретаря
спеціалізованої вченої ради

О.М. Огар

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В умовах розвитку міжнародної торгівлі комерційна успішність залізничної галузі кожної країни світу, зокрема України, залежить від спроможності залізниць пристосувати власні технології перевезень до сформованих вимог якості транспортної послуги на глобальному транспортно-логістичному ринку. На даному ринку величина тарифу на перевезення і точність часу прибуття в пункт призначення в цілому є найбільш важливими факторами, які визначають якість транспортної послуги.

Аналіз світових тенденцій розвитку ринку вантажних перевезень та існуючого стану залізничного транспорту України показав невідповідність рівня якості транспортної послуги встановленим вимогам на ринку перевезень. Одним із напрямків підвищення якості транспортних послуг для залізничного транспорту є перехід від монопольного до конкурентного ринків перевезень за рахунок дерегуляції транспортної галузі. Відповідно до прийнятого напрямку розвитку економіки країни в межах інтеграції з Європейським Союзом (ЄС), Плану заходів з імплементації Угоди про асоціацію між Україною та ЄС, затверджених розпорядженням КМУ від 17.09.2014 №847-р, та згідно з Планами імплементації Директив ЄС у сфері залізничного транспорту фундаментальною основою реформування залізниць загального користування України є створення умов для започаткування конкуренції на ринку залізничних перевезень. Розвиток конкуренції реалізується за рахунок впровадження моделі функціонування залізничного транспорту з розділенням функцій управління інфраструктурою та здійснення експлуатаційної діяльності. Це у свою чергу сприяє утворенню незалежних компаній-перевізників, головною умовою функціонування яких є принцип недискримінаційного доступу до залізничної інфраструктури, якою монопольно управляє сітєвий оператор. Така система взаємовідносин дозволяє створити новий сектор на ринку маршрутних перевезень, який заснований на продажу пропускної спроможності інфраструктури. При реалізації даної системи ринкових відносин для залізничного транспорту України набуває актуальності вирішення наукової проблеми формування методів управління розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури, так як від ефективності та швидкості узгодження доступу до залізничної мережі великої кількості конкуруючих компаній залежать фінансові результати всіх учасників залізничних перевезень.

Рішення проблеми управління розподілом пропускної спроможності в умовах недискримінаційного доступу користувачів до залізничної інфраструктури вимагає перегляду фундаментальних основ організації перевізного процесу на залізницях України. Важливим є утворення механізму перерозподілу використання пропускної спроможності на мережі через відмову від моделі перевезень за найкоротшими (тарифними) відстанями, що встановлюються планом формування поїздів (ПФП); приділення уваги важливості проблеми перевантаження залізничної мережі; актуалізації значення руху вантажних поїздів за графіком та реалізації системи перевезень на основі появи властивості самоорганізації учасників ринку. За таких умов необхідним стає формування методів, які дозволять: систематизувати і класифікувати технічні та технологічні можливості залізничної інфраструктури;

оцінити реальну пропускну спроможність залізничної інфраструктури для уникнення її перевантаження; розробити процедуру розподілу пропускну спроможності залізничної мережі на тактичному рівні планування. Це вимагає пошуку нових аналітичних підходів для опису функціонування залізничної мережі України в умовах недискримінаційного доступу користувачів до залізничної інфраструктури.

Реалізація зазначених заходів дозволить сформувати автоматизовану систему управління розподілом пропускну спроможності залізничної інфраструктури для вирішення комплексу задач планування перевезень від подачі заявки на організацію маршруту до розподілу поїздопотоків, розробки нитки графіка руху поїздів та її аналізу. Це дозволить перейти до формування залізничної інтелектуальної транспортної системи, що надасть учасникам ринку перевезень більшу інформативність, вищий рівень взаємодії між учасниками перевізного процесу.

Зважаючи на вищевикладене, тема дисертаційної роботи є актуальною і зорієнтованою на вирішення проблеми управління залізничним транспортом України в умовах недискримінаційного доступу до залізничної інфраструктури.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась відповідно до Транспортної стратегії України на період до 2020 року, що затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України (КМУ) від 20.10.2010 р. № 2174-р, Державної цільової програми реформування залізничного транспорту на 2010-2019 рр., затвердженої постановою КМУ від 16.12.2009 № 1390, та згідно з Планами імплементації Директив ЄС у сфері залізничного транспорту, схваленими розпорядженням КМУ від 26.11.2014 №1148-р, а також науково-дослідними роботами за темами “Розробка технології автоматизації корегування ПФП в умовах нерівномірного виникнення потужних струменів вагонопотоків” (ДО №0211U005391); “Дослідження вагонопотоків та розробка вимог до складання технологічного процесу роботи залізничного напрямку” (ДО №0211U005392); “Розробка вимог щодо визначення нормативної чисельності персоналу з організації перевезень та поточного утримання інфраструктури залізничного напрямку” (ДО №0212U008191); “Розробка класифікації залізничних напрямків на категорії інфраструктури за техніко-експлуатаційними характеристиками” (ДО №0212U008192); “Розробка методики визначення раціональних співвідношень між потужністю вагонопотоків та пропускну спроможністю на залізничних напрямках для встановлення технічних і технологічних можливостей перевізника” (ДО №0213U004221); “Формування комплексу універсальних моделей, реалізація яких забезпечує раціональну організацію вантажопотоків на залізничній транспортній мережі” (ДО №0214U003188); “Розробка вимог для планування маршрутів слідування вагонів з небезпечними вантажами при мінімізації ризиків в умовах Придніпровської залізниці” (ДО №0214U005239); “Проведення дослідного автоматизованого розрахунку нормативного графіка руху поїздів на залізничному напрямку” (ДО №0214U005803); “Методи формування інтелектуальних залізничних транспортних систем” (ДО №0215U000327).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності функціонування залізничного транспорту України в умовах недискримінаційного доступу до залізничної інфраструктури на основі розробки

методів управління розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури, які передбачають відмову від централізованого керування та впровадження принципу управління, що стає внутрішньою функцією системи на основі появи самоорганізації.

Реалізація цієї мети потребує постановки та вирішення таких задач дослідження:

- провести аналіз тенденцій розвитку ринку вантажних перевезень на залізницях світу та України;
- виконати аналіз наукових досліджень у галузі проблем управління розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури для обґрунтування необхідності пошуку нових методів управління на залізничному транспорті України в умовах формування ринку транспортних послуг, який заснований на продажу пропускної спроможності залізничної інфраструктури;
- проаналізувати властивості системи просторової організації вагонопотоків в поїзди на мережі залізниць України на основі методів аналізу складних мереж;
- розробити концептуальний підхід до управління розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури в умовах недискримінаційного доступу з позиції парадигми складності комплексних систем;
- розробити метод класифікації залізничних дільниць і напрямків на категорії інфраструктури для визначення більш точних умов експлуатації залізничної мережі і, як наслідок, підвищення ефективності управління розподілом пропускної спроможності інфраструктури залізничної мережі України;
- дослідити процеси взаємовпливу поїздів в умовах їх затримок на експлуатаційну надійність залізничної дільниці;
- розробити метод розрахунку пропускної спроможності залізничної інфраструктури з урахуванням обліку експлуатаційної надійності дільниці;
- формалізувати процес функціонування залізничної мережі в умовах розподілу пропускної спроможності залізничної мережі шляхом пристосування режимів експлуатації інфраструктури залізничної мережі до вимог користувачів;
- обґрунтувати вплив статистичних макровластивостей структури маршрутизації поїздопотоків на ефективність розподілу пропускної спроможності залізничної інфраструктури;
- сформулювати вимоги до інформаційно-керуючої системи, яка дозволить автоматизувати процес управління розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури на залізницях України;
- обґрунтувати економічну доцільність впровадження автоматизованої системи управління розподілом пропускної спроможності на залізницях України.

Об'єкт дослідження – процес організації перевезень на залізничному транспорті.

Предмет дослідження – пропускна спроможність залізничної інфраструктури в умовах недискримінаційного доступу.

Методи дослідження. Виконані дослідження базуються на таких засадах: методах теорії ймовірностей та математичної статистики для проведення аналізу експлуатаційних показників залізничного транспорту України та перевірки на

точність і адекватність розроблених математичних моделей; методах аналізу складних мереж для дослідження властивостей системи організації поїздопотоків на залізницях України; методах теорії перколяції вузлів для дослідження живучості системи організації поїздопотоків; теорії організованої складності систем при формуванні концептуального підходу до управління розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури в умовах недискримінаційного доступу; методі ієрархічного кластерного аналізу при класифікації поїздодільниць; методах оптимізації, аналітичних методах і імітаційному моделюванні при реалізації методу розрахунку практичної пропускної спроможності залізничної дільниці; методах мультидисциплінарної оптимізації, зокрема методі генетичного алгоритму та алгоритму мурашиних колоній при формалізації процесу функціонування залізничної мережі в умовах спеціалізації її інфраструктури; спектральної теорії графів при дослідженні властивостей заплутаності мережі маршрутизації поїздопотоків при розподілі пропускної спроможності залізничної інфраструктури.

Наукова новизна одержаних результатів. В дисертаційній роботі теоретично обґрунтовано наукові підходи щодо формування методів управління розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури на основі принципів самоорганізації, що передбачає відмову від централізованого керування та впровадження принципу управління на основі непрямого впливу на процес направлення поїздопотоків шляхом пристосування режимів експлуатації залізничної мережі до вимог транспортного ринку. Це дозволить підвищити ефективність функціонування залізничного транспорту в умовах недискримінаційного доступу до залізничної інфраструктури та раціонально перерозподілити пропускну спроможність залізничної мережі для більш ефективної стратегії управління ресурсами залізничного транспорту.

У дисертаційній роботі:

– уперше підтверджено гіпотезу про існування властивості масштабної інваріантності в мережі призначень плану формування поїздів на залізницях України, що дозволяє віднести мережу до класу масштабно-інваріантних, спростовує розподіл зв'язків за законом Пуассона та підтверджує, що її розвиток лежить в основі процесів самоорганізації складних нелінійних систем;

– уперше розроблено метод класифікації залізничної інфраструктури для експлуатаційної діяльності, який, на відміну від існуючих, дозволяє поділити дільниці та напрямки з урахуванням їх технічних і технологічних особливостей, що встановлюються графіком руху поїздів та призначений для формування системи оцінок залізничної інфраструктури за транспортно-експлуатаційними якостями та споживчими властивостями і, як наслідок, для підвищення ефективності управління розподілом пропускної спроможності інфраструктури залізничної мережі України;

– уперше встановлено залежності коефіцієнта готовності від кількості поїздів та прийнятого рівня виконання графіку руху поїздів на залізничній дільниці;

– уперше розроблено метод розрахунку практичної пропускної спроможності залізничної інфраструктури, який, на відміну від існуючих, дозволяє врахувати експлуатаційну надійність залізничної дільниці та підвищити точність оцінки раціональних меж її завантаження;

– уперше формалізовано процес функціонування залізничної мережі в умовах спеціалізації залізничної інфраструктури на основі математичної моделі розподілу пропускної спроможності залізничної мережі з урахуванням принципів самоорганізації, яка, на відміну від існуючих, дозволяє пристосувати режим експлуатації інфраструктури залізничної мережі до умов транспортного ринку з урахуванням досягнення раціонального розподілу пропускної спроможності мережі та підвищення показників живучості системи просторової організації поїздопотоків за рахунок покращення спектральних властивостей мережевої топології їх маршрутів;

– уперше для залізничних мереж доведено та оцінено вплив максимізації глобальної міри спектрального розширення графової структури маршрутизації поїздопотоків на розподіл пропускної спроможності залізничної інфраструктури у мережі;

– доопрацьовано комплекс функціональних задач системи АСК ВП УЗ-Є з можливістю формування автоматизованої системи управління розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури (АСУ ПС) на базі розподіленої системи підтримки прийняття рішень (СППР) для реалізації задач планування перевезень від подачі заявки на організацію маршруту до розподілу поїздопотоків, розробки нитки графіка руху поїздів та його аналізу.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дисертаційного дослідження щодо формування методів управління розподілом пропускної спроможності інфраструктури залізниць України є основою для імплементації Директиви 91/440/ЄС від 29 липня 1991 року “Про розвиток залізниць Співтовариства” та Директиви 2001/14/ЄС від 26 лютого 2001 року “Про розподілення пропускної спроможності залізничної інфраструктури, стягнення зборів за користування залізничною інфраструктурою та сертифікацію безпеки”. Розроблений концептуальний підхід до управління розподілом пропускної спроможності залізничної мережі України, розроблений метод класифікації залізничних дільниць, запропонований метод оцінки пропускної спроможності залізничних дільниць та реалізована математична модель для пристосування режимів руху до вимог транспортного ринку дозволяє сформулювати порядок та правила експлуатаційної роботи в умовах функціонування ринку продажу доступу до залізничної інфраструктури, який можна оцінити, тільки в межах маршрутних перевезень, до 40% від загального обсягу перевезень.

Запропонований метод класифікації залізничних дільниць і напрямків для експлуатаційної діяльності дозволяє більш гнучко і деталізовано відображати можливості інфраструктури з урахуванням її технічних і технологічних особливостей в частині пропуску поїздопотоків, що, як наслідок, надасть можливість диференціювати нормативи утримання інфраструктури, розробити тарифи доступу та гармонізувати швидкості руху поїздопотоків на мережі для зменшення коефіцієнтів знімання пропускної спроможності поїздів різних категорій.

Запропонований метод розрахунку пропускної спроможності залізничної дільниці дозволяє підвищити точність визначення максимальної кількості поїздів на дільниці та уникати її перевантаження, що у свою чергу підвищить швидкість

просування вантажопотоків та вплине на ефективність формування логістики перевезень залізничним транспортом.

Проведені дослідження живучості системи просторової організації вагонопотоків в поїзди на мережі залізниць України дозволяють оптимізувати використання капітальних інвестицій та реалізувати експлуатаційну роботу для підвищення пропускної спроможності мережі за рахунок виявлення небажаних властивостей та уразливих елементів системи перевезень. Експериментальні результати моделювання розподілу пропускної спроможності залізничної мережі доводять важливість пристосування режимів експлуатації інфраструктури залізничної мережі до вимог користувачів з боку компанії, що управляє залізничною інфраструктурою.

Розроблений комплекс методів та моделей дозволяє сформувати автоматизовану систему управління розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури на базі розподіленої СППР для реалізації процедури планування на рівні Департаменту управління перевезень, служб перевезень залізниць та всіх учасників перевізного процесу. Економічний ефект від впровадження даної автоматизованої системи з наростаючим підсумком за період п'яти років становить 1,39 млрд. грн, дільнична швидкість збільшиться на 1,5 %, час затримок поїздів скоротиться на 5%.

Основні наукові результати щодо формування системи управління розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури впроваджені Департаментом управління перевезень Укрзалізниці при удосконаленні експлуатаційної роботи залізниць, а також у навчальному процесі Навчально-наукового інституту перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ) при проведенні занять у групах факультету підвищення кваліфікації кадрів та при вивченні дисципліни “Управління експлуатаційною роботою”, підготовці спеціалістів і магістрів. Практичне впровадження результатів роботи підтверджується відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати роботи отримані особисто автором та проводилися в УкрДУЗТ. У наукових працях, які опубліковані у співавторстві, автору належить: у [1] – розробка механізмів реалізації принципів самоорганізації при розвитку залізничної транспортної системи; [2,10,11,13,25,27] – сформовано ряд основних принципів побудови математичної моделі на основі генетичного алгоритму з урахуванням обмежень на пропускну спроможність дільниць, які покладено в основу математичної моделі розподілу пропускної спроможності залізничної інфраструктури; [4,37] – дослідження складності задачі комбінаторної оптимізації; [5,35] – аналіз наукових досліджень у галузі проблеми управління пропускнуою спроможністю залізничної інфраструктури; [6-9,30,31] – формулювання принципів організації перевезень на основі руху поїздів за розкладом на виділених спеціалізованих напрямках для підвищення пропускної спроможності залізничної мережі; [12] – застосування системи мурашиних колоній для розв’язання задачі оптимізації залізничних перевезень; [26,39] – дослідження властивостей системи організації поїздопотоків на залізницях України на основі методів аналізу складних мереж; [18,19,36] – дослідження пропускної спроможності залізничної дільниці з позиції теорії транспортних потоків; [22] – розробка методу розрахунку

пропускної спроможності залізничної дільниці на основі обліку експлуатаційної надійності залізничної дільниці; [23] – аналіз проблем розрахунку пропускної спроможності залізничної інфраструктури в умовах ринкових відносин та визначення напрямів досліджень; [24,] – аналіз досліджень у галузі проблем проектування транспортних мереж; [28] – розробка процедури надання нитки графіка руху поїздів для поїзного формування з вагонами операторських компаній; [32] – формулювання концепції виділення на залізничній мережі спеціалізованих напрямків та їх класифікація; [34] – розробка математичної моделі розподілу пропускної спроможності залізничної інфраструктури з урахуванням її спеціалізації.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідалися, обговорювалися та ухвалені на 22 Міжнародній науково-практичній конференції (МНПК) “Перспективні комп’ютерні, керуючі та телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України” (м. Алушта, 2009 р.); 7 МНПК “Проблеми міжнародних транспортних коридорів та єдиної транспортної системи України. (смт. Коктебель, 2011 р.); III МНПК “Інноваційні технології на залізничному транспорті”, (Ізраїль, м.Тель-Авів, 2012 р.); МНПК “Сучасні інформаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті”, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту (ДНУЗТ) (м. Дніпропетровськ, 2012 р.); XXXVI науково-технічній конференції викладачів, аспірантів і співробітників Харківської національної академії міського господарства (м. Харків, 2012 р.); VIII МНПК “Проблеми міжнародних транспортних коридорів та єдиної транспортної системи України” (м. Харків, 2012 р.); конференції SWorld. Scientific researches and their practical application. Modern state and ways of development‘2012 та ‘2013 (Інтернет-конференція 2012, 2013 pp.); Семінарі-нараді провідних спеціалістів Укрзалізниці (м. Запоріжжя, 2012 р.); II МНПК “Обчислювальний інтелект - 2013 (результати, проблеми, перспективи) Computational Intelligence, ComInt – 2013” (м. Черкаси, 2013 р.); 75, 76, 77 МНПК “Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті” (м. Харків, 2013, 2014, квітень 2015 pp.); 27 МНПК “Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті” (м. Харків, 2014 р.).

Повністю дисертаційна робота доповідалася та схвалена на розширеному засіданні кафедри управління експлуатаційною роботою УкрДУЗТ та на міжкафедральному семінарі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна.

Публікації. Відповідно до теми дисертації опубліковано 42 наукові праці, з яких 26 статей (з яких 15 – опубліковані у фахових наукових виданнях України, що включені до міжнародних наукометричних баз, і одна стаття у виданнях інших держав), два патенти на корисну модель та 14 тез доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг тексту дисертації – 412 сторінок, обсяг основного тексту складає 252 сторінки друкованого тексту (6 сторінок зайняті на повну площу 5 рисунками і 1 таблицею), 95 рисунків, 8 таблиць, список використаних джерел включає 296 найменування і 12 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі дослідження, відображено наукову новизну та практичну цінність, подано загальну характеристику роботи, наведено дані про апробацію.

У першому розділі, виходячи із мети дисертаційної роботи, проведено аналіз світових тенденцій розвитку ринку вантажних перевезень. Встановлені основні фактори підвищення конкурентоспроможності залізничного транспорту на глобальному ринку перевезень. Виконаний аналіз функціонування залізниць України в діючих умовах організації перевезень показав значну зношеність основних фондів, а технології перевезень не дозволяють забезпечити точність доставки вантажів. Детальний аналіз завантаженості залізничних дільниць довів наявність нерівномірності використання залізничної мережі України, що призводить до перевантаження основних напрямків просування поїздопотоків. Дана ситуація вимагає перегляду існуючих підходів до розподілу пропускної спроможності на мережі. Важливим є рівномірний підхід до використання інфраструктури залізничного транспорту. Для виявлення більш досконалих форм управління ресурсами залізничного транспорту проведено аналіз ефективності реформування залізниць загального користування за моделлю функціонування ринку залізничних перевезень на основі розділення функцій управління інфраструктурою та здійснення експлуатаційної діяльності. Обґрунтовано необхідність розробки нових методів управління розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури в умовах реформування залізничного транспорту України.

Проблемами, пов'язаними з управлінням розподілом пропускної спроможності інфраструктури залізничних мереж різних країн світу, займалися багато вчених та практиків, таких як: М. Abril, А.А. Assad, Т. G. Crainic, S. Gibson, М. R.Bussieck, Q. Zhuang, X. Zhang, E. Zhu, T. Schlechte, S. G. Klabes, R. Borndörfer, M. Peña-Alcaraz, S. S. Harrod, K. Sameni, A. Landex, J. Preston та інші.

Окремими питаннями даної проблеми для залізничної мережі України або її подібної, а саме: розробка методів розрахунку пропускної спроможності; розробка плану формування поїздів та графіка руху поїздів (ГРП), застосування інформаційних технологій в експлуатаційній роботі, займалися такі вчені та фахівці: В.М. Акулінічев, Є.В. Архангельський, А.Г. Барткус, А.П. Батурін, В.І. Бобровський, Т.В. Бутько, П.С. Грунтов, В.К. Губенко, М.І. Данько, Б. Дель Ріо, І.В. Жуковицький, А.Д. Каретніков, Д.М. Козаченко, І.Т. Козлов, О.В. Лаврухін, Д.Ю. Левін, Д.В. Ломотько, А.М. Макаро́чкін, Б.М. Максимович, В.К. Мироненко, Є.В. Нагорний, В.Я. Негрей, А.П. Петров, В.В. Повороженко, М.В. Правдін, Н.О. Самаріна, В.В. Скалозуб, О.І. Стасюк, І.Г. Тихомиров, Є.М. Тішкін, Н.Б. Чернецька-Білецька, П.О. Яновський та інші.

Всі існуючі дослідження, що стосуються пропускної спроможності інфраструктури залізниць України, більш сконцентровані або на визначенні дільниць для збільшення пропускної спроможності за рахунок капітальних інвестицій, що є завданням стратегічного планування, або на удосконаленні методів розрахунку пропускної спроможності. Проблемі управління розподілом пропускної спроможності в теорії експлуатації залізниць пострадянської наукової школи

великого значення не приділялось. Це пояснюється специфікою технології функціонування залізничного транспорту, в якій не надавалося значення руху вантажних поїздів за розкладом та не приділялося уваги важливості проблеми перевантаження залізничної мережі. Крім того, значно ускладнювалось розуміння необхідності управління розподілом пропускної спроможності відсутністю однозначного поняття терміну “пропускна спроможність”. Відповідно до досліджень Міжнародного союзу залізниць (UIC) та останніх досягнень у галузі теорії транспортних потоків сформульовано поняття предмету дослідження даної дисертації, за яким пропускна спроможність є змінною величиною, а процес її зміни залежить від встановлених умов експлуатації інфраструктури (швидкості руху поїздів в умовах кооперативної динаміки їх у потоці, варіантів їх розташування у ГРП, встановленого рівня виконання ГРП на дільниці тощо). За таким підходом існуюче на залізницях України поняття – наявна пропускна спроможність визначає верхню теоретичну межу завантаження дільниці, що відповідає технічному оснащенню дільниці за ідеально встановленими умовами прокладки поїздів, які на практиці реалізувати майже неможливо. Сучасний розвиток теорії експлуатаційної роботи залізниць повинен ґрунтуватися на квазістохастичному розумінні поняття залізничної транспортної системи, що у свою чергу передбачає можливість здійснення управління її пропускною спроможністю. Під управлінням розподілом пропускної спроможності розуміється застосування прямих і непрямих заходів щодо планування, організації, мотивації і контролю в системі перевезень для забезпечення оптимального компромісу між рівнем використання пропускної спроможності залізничної мережі та якістю надання транспортних послуг.

При цьому для вирішення проблеми управління розподілом пропускної спроможності мережі запропоновано застосувати комплексний підхід з інтеграцією всіх етапів планування на рівні тактичного і оперативного управління.

У другому розділі для формування нових методів управління розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури досліджено властивості системи організації перевезень на залізничному транспорті України на основі методів аналізу складних мереж (англ., Complex Network Analysis).

Для проведення аналізу запропоновано план формування поїздів (ПФП) розглядати як мережеву структуру, що утворює своєрідний каркас складної системи просторової організації вагонопотоків у поїзди на залізничному транспорті України, тоді як дослідження властивостей таких структур дає змістовну інформацію про властивості складної системи в цілому. Для проведення даного мережевого аналізу була використана інформація з діючого ПФП на залізницях України за 2012-2013 рр. Інструментом реалізації аналізу був вільно доступний програмний продукт RAJEK. Запропонований підхід до аналізу ПФП базується на поданні взаємозв'язків між станціями у вигляді направленої графа, 181 вершина якого відповідає станціям формування поїздів, тоді як 482 дуги є призначеннями ПФП, рис. 1.

Проведений аналіз дозволив визначити метрики графової структури, що відображають силу впливу та залежність станцій в системі поїздоутворення, зокрема був визначений порядок зв'язків станцій: загальний ступінь центральності вузлів – в межах від 0,079 до 0,003, близькості – від 0,4663 до 0,1912, посередництва – від 0,1417 до 0,0001; щільність мережі – 0,01471, діаметр – 8, коефіцієнт кластеризації –

0,13384, бі-компоненти – 76 компонент, з яких одна найбільша група складає 54,7% від загальної кількості станцій в мережі, що підтверджує наявність гігантської компоненти. Знайдені коефіцієнти кореляції Пірсона та Спірмана між параметрами центральності ступеня вершин та середніми ступеня їх найближчих сусідів для зв'язків різних типів: вхідних – $r_{int}^{Pirs} = 0,23362$; $r_{int}^{Spir} = 0,51563809$; вихідних – $r_{out}^{Pirs} = 0,31997$; $r_{out}^{Spir} = 0,68164602$; взаємних – $r_{all}^{Pirs} = -0,12477$; $r_{all}^{Spir} = -0,08526248$. Виявлено властивість асортативного змішування за вхідними та вихідними зв'язками в мережі, що підтверджує існування в мережі ПФП ефекту малого світу.

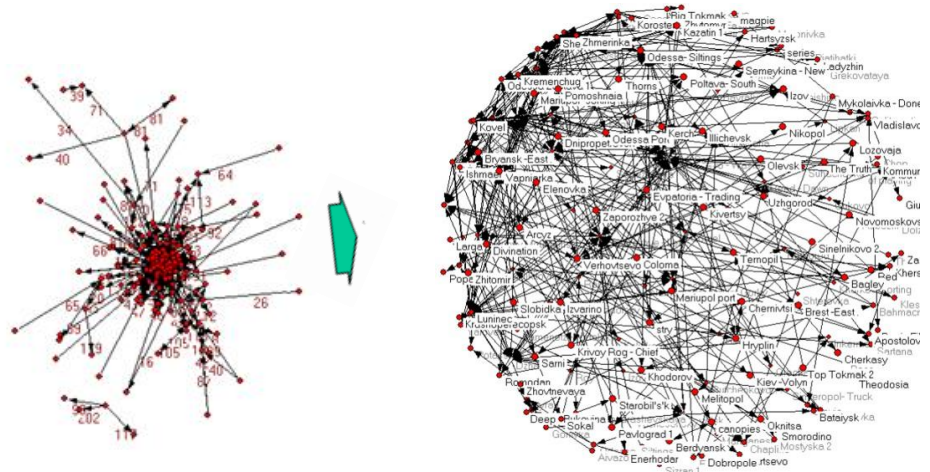


Рис. 1. Візуалізація графу мережі призначень ПФП за допомогою програми RAJEK

Статистично доведено гіпотезу підпорядкування емпіричного розподілу ступеня вершин мережі призначень ПФП залізниць України степеневому закону, що підтверджує належність даної мережі до класу безмасштабних мереж (англ., free-scale networks). Дослідження показали, що розподіл вхідних ступенів підпорядковується степеневому закону з константою ~ 2.34 , вихідних ступенів – з ~ 2.07 , загальних ступенів – з ~ 1.9 . Гістограми розподілу ймовірностей ступенів вершин графу у подвійних логарифмічних координатах наведено на рис. 2.

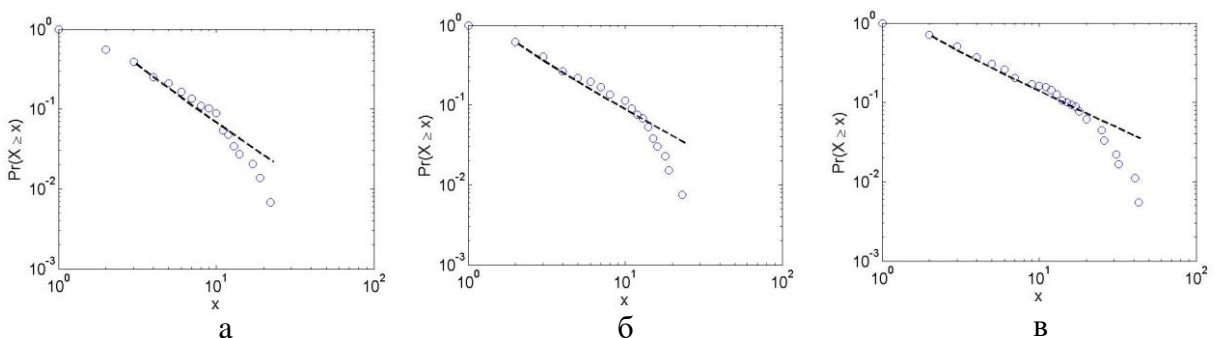


Рис. 2. Гістограми розподілу ймовірностей ступенів вершин графу у подвійних логарифмічних координатах: а) розподіл вхідних ступенів; б) розподіл вихідних ступенів; в) розподіл загальних ступенів

Спираючись на степеневий розподіл, можна стверджувати, що така структура, як мережа призначень ПФП на залізницях України, відноситься до типу так званих безмасштабних мереж (англ., scale-free network), якій властива масштабна

інваріантність. Для підтвердження виявленої за статистичним підходом гіпотези в роботі виконано експериментальні дослідження живучості даної мережі за допомогою теорії перколяції. Дослідження живучості структури були спрямовані на виявлення самоподібності її перколяційного кластера, що дозволяє підтвердити наявність властивості масштабної інваріантності в системі організації поїздопотоків.

Для дослідження живучості системи організації поїздопотоків в роботі розроблено дискретну модель перколяції вузлів, в основі якої лежить граф мережі призначень ПФП L . Вершини графа L можуть бути в активному стані з ймовірністю p та в неактивному (деактивованому) з ймовірністю $q = 1 - p$. На кожному кроці перколяції після моделювання відмови у мережі призначень ПФП встановлюються вершини графа $v \in L$, які знаходяться в активному стані та утворюють відкритий кластер скінченного розміру $C(v)$, тоді як деактивовані вершини призводять до пустого кластеру $C = C(0)$. За такою постановкою визначається функція ймовірності перколяції $p \mapsto \theta(p)$, де $\theta(p) = P_p(|C| = \infty)$ і критична ймовірність $p_c = \sup\{p : \theta(p) = 0\}$, або поріг протікання, якому відповідає критичний рівень живучості системи – критична концентрація відмов у мережі призначень ПФП, коли виникає зв'язна область станцій, що припинили виконувати свої функції, або так званий “перколяційний” кластер, який призводить до неможливості пропуску поїздопотоків у мережі. Для визначення порогу перколяції мережі призначень ПФП використано критерій протікання, яким є показник – середній інверсний шлях між вузлами мережі, що розраховується за формулою

$$l_{inv} = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i>j} \frac{1}{d_{ij}}, \quad (1)$$

де n – кількість вузлів; d_{ij} – найкоротша відстань між вузлами i та j , що вимірюється у кількості кроків. За таких умов порогу перколяції буде відповідати момент, при якому середній шлях між станціями в мережі досягне найбільшого значення, що відповідає найменшим значенням пропускнуої спроможності залізничної мережі.

Для доведення самоподібності запропоновано згенерувати різної розмірності безмасштабну мережу типу Барабаші-Альберта з параметрами степеневого закону розподілу, які має реальна мережа призначень ПФП, та дослідити їх структуру на живучість за допомогою запропонованої математичної моделі перколяції вузлів. Перколяція проводилась двох видів: в умовах випадкових відмов станцій в мережі (випадкова перколяція) та при так званих запланованих відмовах (корельована перколяція), коли деструктивний вплив здійснюється цілеспрямовано послідовно на станції з найбільшим вихідним ступенем зв'язності. Візуалізація реальної мережі призначень ПФП на початковому етапі моделювання та при досягненні порогу перколяції подано на рис. 3. Встановлено, що при випадковій і корельованій перколяції повне руйнування мережі призначень ПФП відбувається в умовах відмови відповідно 94% та 45% станцій від загальної кількості. В умовах запланованих відмов досягнення порогу протікання виникає при послідовній відмові 8,2% станцій з найбільшим вихідним ступенем, що характеризує топологічну структуру даної мережі як дуже нестійку при руйнуваннях такого типу.

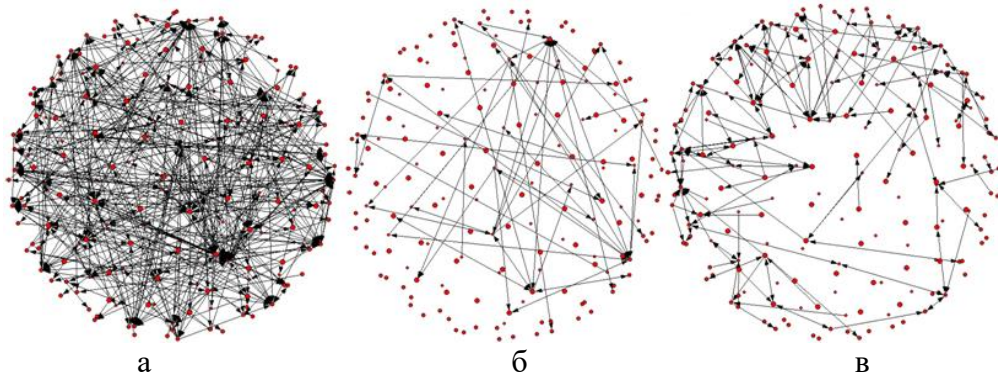


Рис. 3. Граф мережі призначень ПФП: а) перед деструктивним впливом; б) на 130 кроці руйнування мережі при досягненні порогу протікання при випадковій перколяції; в) на 15 кроці руйнування мережі при досягненні порогу протікання при корельованій перколяції

Порівняльний аналіз результатів перколяції за двома варіантами деструктивного впливу на вузли мережі показав збіг з результатами перколяції реальної мережі призначень ПФП, що доводить існування властивості самоподібності. Порівняльними показниками при перколяції були: відсоток видалених станцій в мережі, при якому виникає фрагментація мережі, середній інверсний шлях між вузлами мережі, діаметр графової структури, значення розміру другого за величиною кластера в мережі від кроків руйнування. Графіки, які ілюструють динаміку зміни показника l_{inv} за двома варіантами перколяції наведено на рис. 4.

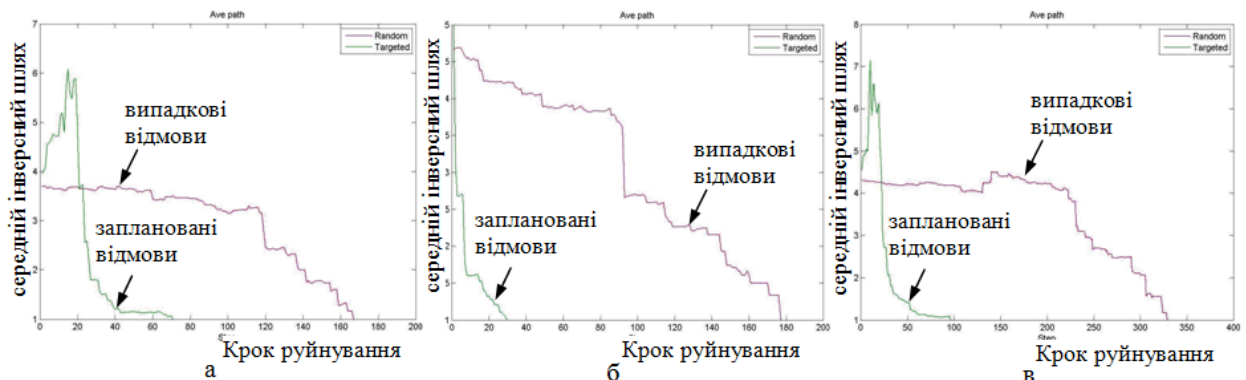


Рис. 4. Графік залежності середнього інверсного шляху в мережі призначень ПФП від кроків руйнування за двома варіантами перколяції: а) реальна мережа; б) перша модельна мережа; в) друга модельна мережа

Виявлена властивість масштабної інваріантності в мережі призначень ПФП спростовує розподіл зв'язків за законом Пуассона. Отже, зроблено висновок, що розвиток графу мережі призначень ПФП лежить в основі процесів самоорганізації складних нелінійних систем. Чим більша складність, тим очевидніше, що система перевезень на залізничному транспорті є високоорганізована, інтегрована структура, яку неможливо повністю описати та контролювати.

Спираючись на вищезазначені висновки, в дисертації розроблено концептуальний підхід до управління системою перевезень, зокрема до управління

розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури України з позиції парадигми організованої складності (англ., organised complexity). Спираючись на складність системи перевезень, в дисертаційній роботі запропоновано розробити метод управління розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури України на основі непрямого впливу на процес поїздоутворення за рахунок природних процесів виникнення складних структур при відсутності нав'язаного зовнішньою дією порядку. В основі даного методу покладено принцип децентралізації системи управління за рахунок розділення функцій “експлуатації” та “інфраструктури”, що дозволить завдяки самоорганізації конкурентного ринку перевезень подати залізничну мережу як платформу взаємодії між виробником і споживачем транспортної послуги. Це дозволить запуснути механізм самоорганізації в системі перевезень.

Це вимагає на тактичному рівні управління відмінити деталізоване планування за рахунок відмови від направлення вагонопотоків за найкоротшими напрямками для маршрутних поїздопотоків (відмова від ПФП). Це дозволить компаніям-перевізникам обирати маршрути направлення поїздопотоків на мережі відповідно до своїх внутрішніх критеріїв функціонування. Відмовляючись від планування деталей, важливим є створити правила, які стануть своєрідним каркасом системи, в межах якої компанії-перевізники будуть мати ступені свободи щодо самостійних рішень в плануванні своєї роботи. Для досягнення атрактора – множини станів, у яких система найбільш ефективно використовує пропускну спроможність залізничної мережі, важливим є створення заохочень і стимулів у системі перевезень на основі класифікації дільниць і напрямків залізничної мережі для встановлення тарифів відповідно до умов доступу. Це дозволить в межах стимулювання в системі перевезень встановити правила, за якими на перевантажених дільницях вартість проїзду дорожча, але строк доставки вантажу зменшується; на малодіяльних дільницях вартість занижена, але строк доставки вантажу збільшується. Такий підхід дозволяє реалізувати найважливіші складові самоорганізації – це позитивний і негативний зворотні зв'язки в системі.

Для утримання рівноваги в системі не менш важливим є встановлення реальної межі вичерпання пропускної спроможності залізничної мережі, що дозволить уникати фазового переходу системи, і, як наслідок, збитків від експлуатаційної діяльності при перевантаженні залізничних дільниць на мережі. Крім того, важливим є пристосувати режими експлуатації інфраструктури залізничної мережі до вимог користувачів з позиції інтересів усіх учасників ринку залізничних перевезень за критерієм мінімізації витрат та досягнення раціонального розподілу пропускної спроможності мережі.

У третьому розділі розроблено метод класифікації залізничних дільниць та напрямків на категорії інфраструктури для експлуатаційної діяльності, який дозволяє відобразити в межах фрахтового року функціонування ліній як технічні можливості інфраструктури, що задані нормами проектування та існуючим поточним утриманням, так і технологічні особливості, які встановлюються ГРП.

Проведений аналіз закордонного досвіду класифікації залізничної інфраструктури довів, що класифікація залізничних ліній розвивалась у двох напрямках: за конструктивними елементами при проектуванні та за

експлуатаційними витратами на період функціонування ліній протягом дії ГРП для оптимізації витрат на їх утримання і встановлення вартості доступу до інфраструктури. Як відомо, на залізницях України діє класифікація залізничних ліній в частині їх проектування за конструктивними елементами, але дані категорії ліній не враховують реальні умови їх експлуатації та рівень якості транспортної послуги. Спираючись на вищенаведений недолік, в роботі запропоновано нову систему класифікації дільниць, що дозволяє більш гнучко і деталізовано відображати можливості інфраструктури з урахуванням її технічних і технологічних особливостей в частині пропуску поїздопотоків на кожен фрахтовий рік.

Розроблена система класифікації передбачає виділення на мережевому рівні залізничних магістральних напрямків або так званих транспортних коридорів. По суті це технологічні лінії пропуску поїздопотоків з чітко розробленою логістикою, які утворюються за рахунок формування транспортного коридору і нормативно забезпечується виділеною часткою пропускнуої спроможності (кількістю ниток ГРП) з врахуванням технічних і технологічних обмежень інфраструктури залізниць. Тоді як на нижньому рівні декомпозиції залізнична інфраструктура розділяється на такий елемент, як залізнична дільниця, або поїздодільниця. За таких умов сукупність послідовно об'єднаних поїздодільниць утворює магістраль.

Відповідно до діючої концепції розвитку та експлуатації залізничної мережі України запропоновано в методі класифікації виділити магістральні напрямки трьох класів, що відповідають встановленим умовам режиму руху і доступу до них, для поетапного створення наскрізних спеціалізованих підмереж з виділеними коридорами, які краще враховують інтереси залізниць і клієнтів, що дозволить підвищити пропускну спроможність та зменшити витрати на експлуатацію і обслуговування. Слід зазначити, для кожного класу магістралі повинні бути визначені за техніко-економічними розрахунками оптимальні параметри технології пропуску поїздів, які будуть гарантовані для використання компаніям-перевізникам.

Для раціонального розподілу витрат та встановлення умов доступу запропоновано відокремити поїздодільниці на ті, які входять до складу магістральних напрямків, і регіональні. До регіональних дільниць слід відносити розгалужену мережу тупикових ліній і так званих “фідерних” дільниць, на яких виконується передача поїздопотоків на незначні відстані між регіональними центрами. Виділення регіональних дільниць дозволить визначати їх статус як малодіяльні та надавати знижки з тарифу для стимулювання інтенсивності роботи, і як наслідок, перерозподілити навантаження на залізничну мережу в цілому.

Для поділу залізничної інфраструктури за транспортно-експлуатаційними якостями і споживчими властивостями розроблено класифікацію поїздодільниць за видами перевезень і категоріями інфраструктури. Дану класифікацію запропоновано будувати на основі таких критеріїв: за швидкістю руху; за вантажонапруженістю; за технічним оснащенням дільниць; за витратами людино-годин за поїздом; за розмірами руху поїздів; за рівнем виконання ГРП. Для дослідження меж поділу дільниць за видами перевезень і категоріями інфраструктури в роботі застосовано метод ієрархічного кластерного аналізу на основі формування ієрархічного дерева бінарних кластерів. Згідно з аналізом ефективності кластеризації прийнятним є застосування методу зв'язування “найближчого сусіда” та міри близькості за

евклідовою відстанню. Міра відстаней між об'єктами у методі “найближчого сусіда” визначається за виразом

$$d(r, s) = \min[dist(x_{ri}, x_{sj})], i \in (1, \dots, n_r), j \in (1, \dots, n_s), \quad (2)$$

де n_r – число об'єктів у кластері r ; n_s – число об'єктів у кластері s ; x_{ri}, x_{sj} – відповідно i -й об'єкт у кластері r та s . Графічне представлення результатів кластеризації за видами перевезень наведено на рис. 5.

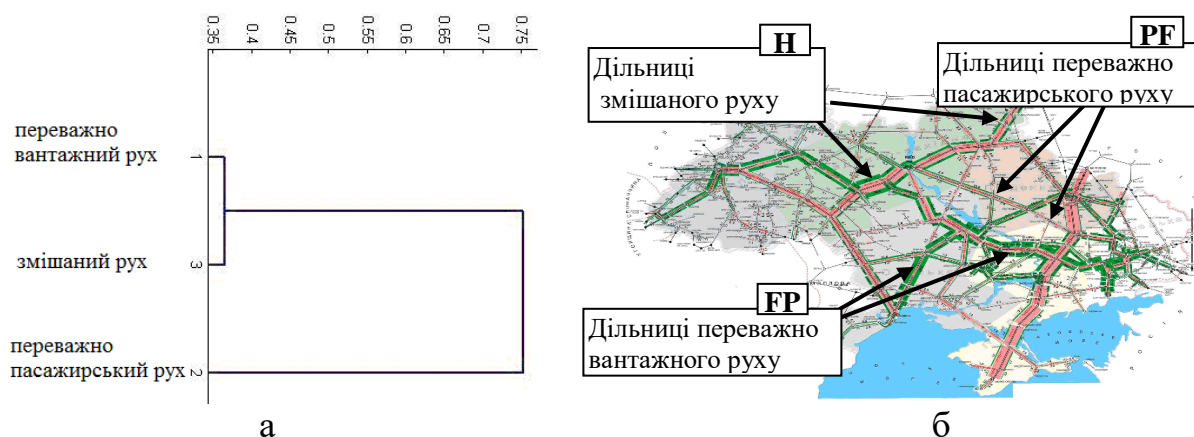


Рис. 5. Класифікація поїздодільниць за видами перевезень: а) дендрограма ієрархічного дерева бінарних кластерів, що відповідають видам перевезень; б) приклад відображення поділу на залізничній мережі України

Принципова схема класифікації залізничних дільниць і напрямків для експлуатаційної діяльності наведена на рис. 6.

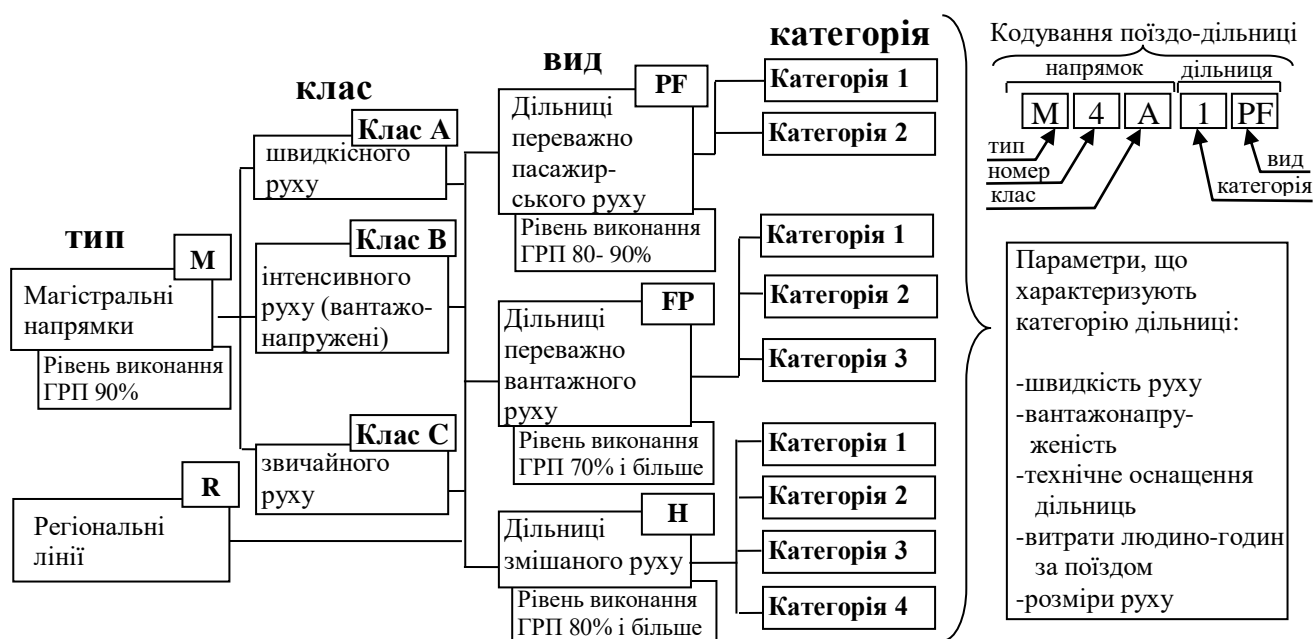


Рис. 6. Принципова схема класифікації залізничних дільниць і напрямків для експлуатаційної діяльності

Класифікація залізничних дільниць та напрямків для експлуатаційної діяльності повинна здійснюватись на кожний поточний рік окремо відповідно до термінів дії ГРП. Віднесення дільниць до відповідних класів до початку процедури розробки ГРП дозволить більш точно формувати вимоги до умов їх експлуатації.

Розроблений метод та сформована на його основі система класифікації дозволяє відобразити реальні можливості функціонування залізничної дільниці, що надає змогу створити більш точні умови експлуатації залізничної мережі і, як наслідок, підвищити ефективність управління розподілом пропускної спроможності інфраструктури залізничної мережі України.

У четвертому розділі досліджено процеси використання пропускної спроможності залізничної мережі при різних режимах експлуатації її залізничної інфраструктури. Розроблено метод розрахунку практичної пропускної спроможності залізничної інфраструктури, який дозволяє підвищити точність визначення максимальної кількості поїздів на дільниці відповідно до встановленого режиму її експлуатації.

Для визначення підходу щодо більш точної оцінки пропускної спроможності залізничних дільниць та напрямків мережі в роботі проведено аналіз проблем розрахунку пропускної спроможності залізничних транспортних систем. Проведений аналіз діючого методу розрахунку наявної пропускної спроможності на залізницях України довів недосконалість існуючого підходу з причин обліку в аналітичних формулах надійності лише постійних технічних пристроїв інфраструктури (колії, пристроїв СЦБ і зв'язку, електропостачання) та рухомого складу (локомотиви, вагони), тоді як відсутнім є облік надійності виконання ГРП. Практика показує, що на умови прямування поїздів у значній мірі впливає вибір технології експлуатації залізничної дільниці, що визначається ГРП та диспетчерським управлінням рухом поїздів. На надійність виконання графікової технології значно впливають організаційно-технологічні причини, зокрема помилкові дії диспетчерського персоналу, відсутність колій приймання для поїздів на станції, збої при слідуванні поїздів через дільницю в умовах виникнення взаємопов'язаних затримок через інші поїзди при значному завантаженні дільниці тощо. Відсутність в аналітичних формулах обліку надійності виконання технології перевізного процесу на розрахунковій дільниці призводить до невиправданого завищення значень пропускної спроможності, що в умовах інтенсивної експлуатації дільниць і напрямків веде до їх перевантаження, тобто до збільшення затримок поїздопотоків і, як наслідок, зниження дільничної швидкості, а отже, і до невиконання строків доставки вантажів.

Для визначення пропускної спроможності, більш наближеної до реальних експлуатаційних умов роботи, запропоновано введення додаткового поняття – практична пропускна спроможність залізничної інфраструктури, яке дозволяє описати можливості інфраструктури, системи організації руху для пропуску встановленої кількості поїздів у межах очікуваного рівня обслуговування (сервісу). Використання додаткового поняття дозволяє розробити метод розрахунку пропускної спроможності залізничної дільниці на основі обліку її експлуатаційної надійності (англ., service reliability).

Для формування об'єктивного методу визначення пропускних спроможностей дільниць в роботі, спираючись на останні досягнення у галузі теорії транспортних потоків, зокрема теорії трьох фаз Кернера, експериментально підтверджено справедливість теоретичних тверджень щодо закономірностей руху транспортних потоків для поїздопотоків на макрорівні функціонування інфраструктури залізниць (рис. 7). На основі статистичних досліджень залежності інтенсивності поїздопотоків (L) від його щільності (R) на дільниці Колосівка – Одеса-Сортувальна встановлено існування в межах фундаментальної діаграми транспортного потоку трьох фаз руху потоку (рис. 7,б): вільний рух, синхронізований (кооперативний) рух і рух у заторі.

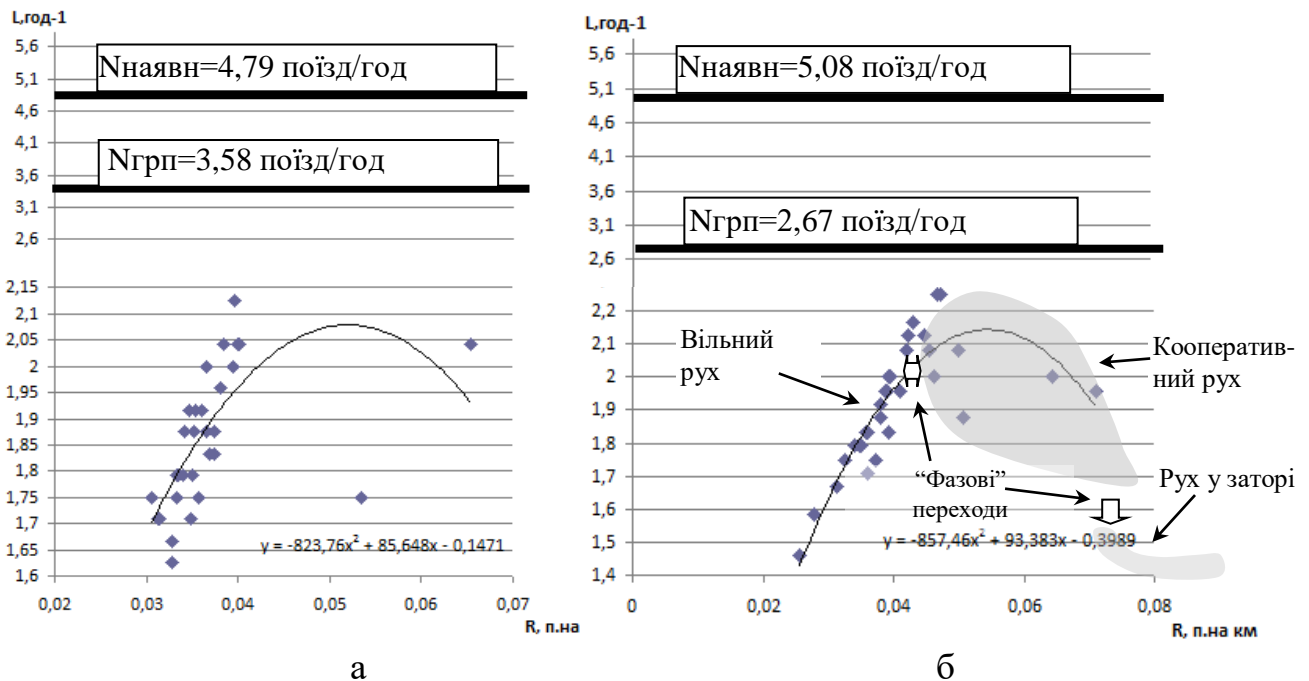


Рис. 7. Залежність інтенсивності поїздопотоків від його щільності на дільниці Колосівка – Одеса-Сортувальна та порівняння значень наявної пропускної спроможності на дільниці $N_{наявн}$ і нормативів обсягів перевезень за графіком руху поїздів $N_{грп}$: а) у парному напрямку; б) у непарному напрямку

Відмінність значень наявної пропускної спроможності від спостережуваних у реальній експлуатації підтверджує необхідність врахування фізики руху поїздопотоків в умовах перевантаження дільниці для вироблення об'єктивних методів визначення пропускних спроможностей дільниць залізниць (рис. 7). Діюча на залізницях України методика розрахунку наявної пропускної спроможності залізничних дільниць ґрунтується на розрахунках, що проводяться для обмежувача перегону (у розрізі), тоді як реально реалізована (практична) пропускна спроможність змінюється та залежить від характеристик потоку поїздів, що прямують по всій дільниці.

Для підтвердження впливу організаційно-технологічних причин на рівень виконання ГРП в роботі виконаний аналіз ГРП за 2014 рік на Харківській дирекції залізничних перевезень Південної залізниці. Відповідно до оброблених даних щодо причин невиконання ГРП за прослідкуванням вантажних поїздів у 2014 році

встановлено, що частка кількості вантажних поїздів, у яких затримки виникали з організаційно-технологічних причин, складає 28,01% від загальної кількості затриманих поїздів, тоді як їх тривалість взагалі складає 69,3% від загального часу затримок.

У даному розділі розроблено метод, який базується на понятті “експлуатаційна надійність”, під якою розуміється властивість залізничної дільниці як системи виконувати функцію пропуску поїздопотоків відповідно до встановленої точності виконання ГРП протягом заданого інтервалу часу (доба). Розглядаючи безвідмовність, як один із параметрів експлуатаційної надійності, важливо визначити поняття відмови. Під відмовою розуміється експлуатаційна відмова, тобто затримка поїзда по прибутті або відправленні на кожній із станцій на дільниці з організаційно-технологічних причин. Крім того, за своєю природою затримки поїздів поділяються на первинні (англ., primary delays), які зумовлені зовнішніми випадковими факторами виникнення збоїв у технології перевезення, та вторинні затримки (англ., secondary delays), які виникають з причин первинної затримки першого поїзда та послідовного порушення розкладу руху інших поїздів, які опинилися в зоні слідування затриманого поїзда, рис. 8.

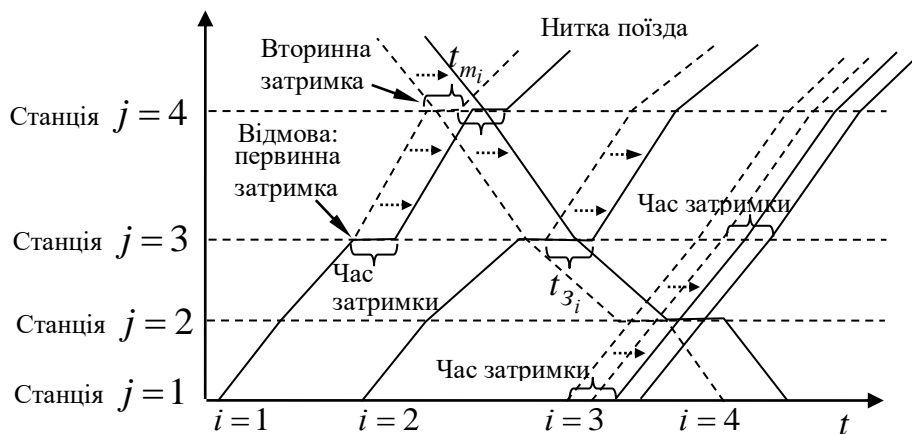


Рис. 8. Схема прокладки ниток поїздів на одноколінійній дільниці при виникненні первинної та вторинних затримок

Виходячи із складності дослідження надійності системи за допомогою аналітичних рішень в методів запропоновано оцінити її за статистичним підходом на основі застосування імітаційного моделювання роботи дільниці за різними варіантами тривалості первинних затримок. Для імітаційного моделювання використано оптимізаційну математичну модель побудови ГРП, яка має цільову функцію з мінімізацією простоїв усіх поїздів на дільниці, та обмеження на кількість приймально-відправних колій на проміжних станціях дільниці. Первинні затримки моделювались за найпростішим законом розподілу, а відповідно до кожної відмови час затримки (відновлення руху поїзда) – за експоненційним законом розподілу.

Як показник оцінки експлуатаційної надійності дільниці запропоновано використати коефіцієнт готовності системи, який характеризує те, що в довільний момент часу t система опиниться в працездатному (безвідмовному) стані. Статистично розрахунок коефіцієнта готовності можна визначити за виразом

$$\alpha_{\text{експл}} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k t_{m_i}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k t_{m_i} + \sum_{i=1}^N t_{z_i}}, \quad (3)$$

де $\sum_{j=1}^k t_{m_i}$ – тривалість зупинки i -го поїзда за нормативним ГРП, год; t_{z_i} –

запізнення поїзда у зв'язку з організаційно-технологічними причинами, на кожній зі станцій дільниці $j = 1, k$, год; N – кількість поїздів на дільниці.

Для кількісної оцінки впливу чинника вторинної затримки на загальний час затримок з організаційно-технологічних причин в роботі проведено експериментальні дослідження на дільниці Колосівка – Одеса-Сортувальна. Отримані результати моделювання відмов свідчать про значний вплив вторинних затримок на надійність графікової технології (рис. 9).

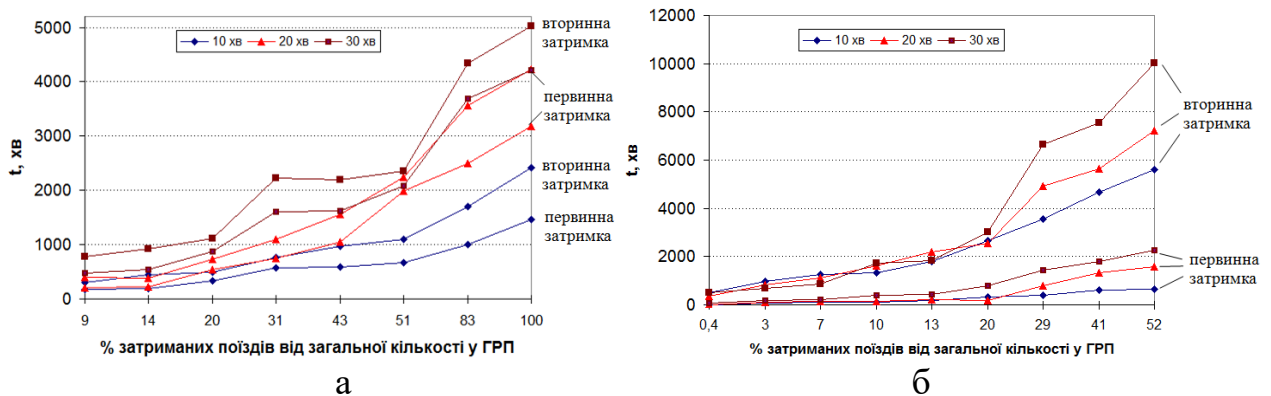


Рис. 9. Залежність тривалості (t) первинної і вторинної затримки від кількості затриманих поїздів на дільниці Колосівка – Одеса-Сортувальна за різним середнім часом первинної затримки: а) рівень завантаження, що відповідає нормативному ГРП; б) рівень завантаження, що відповідає максимальному ГРП

Встановлено, що при різних режимах експлуатації двоколіїної дільниці за умови моделювання середньої затримки 10, 20 та 30 хвилин у середньому частка первинних затримок складає 40 % від загального часу затримок у ГРП для вільного руху та 10 % - для перевантаженого, тоді як частка часу вторинних затримок складає у середньому 60 та 90 % відповідно. Вплив зміни завантаження залізничної дільниці на її експлуатаційну надійність є дуже високим, що доводить необхідність врахування даного фактора при визначенні пропускної спроможності.

Метод розрахунку практичної пропускної спроможності залізничної інфраструктури заснований на визначенні експоненційно спадних залежностей коефіцієнта готовності $\alpha_{\text{експл}}$ від кількості поїздів, прийнятого рівня виконання ГРП для дільниці $p(n) \in (90, 80, 70, 60 \%)$ та встановленого середнього часу затримки t_g

$$n^{\text{практ}} = a \cdot e^{-b \cdot \alpha_{\text{експл}}^{\text{норматив}}}, \quad (4)$$

де a, b – параметри функції, що визначаються методом найменших квадратів при

аналізі залежностей коефіцієнта готовності $\alpha_{експл}$ від кількості поїздів та прийнятого рівня виконання ГРП на дільниці; $\alpha_{експл}^{норматив}$ – коефіцієнт готовності $\alpha_{експл}$, який нормативно встановлюється відповідно до прийнятого режиму експлуатації залізничної інфраструктури на фрахтовий рік; $n^{пратк}$ – максимальна кількість поїздів у ГРП, що прослідують дільницю із дотриманням встановленого рівня виконання ГРП $p(n)$, прийнятого коефіцієнта готовності $\alpha_{експл}^{норматив}$ та при визначеному середньому часі затримки $t_г$.

У запропонованому методі для встановлення даних залежностей проводиться моделювання первинних затримок за прийнятими параметрами законів розподілу, після чого із застосуванням оптимізаційної моделі здійснюється пошук раціонального ГРП з урахуванням відмов та розраховується коефіцієнт готовності відповідно до виразу (3). Розрахунки виконуються для трьох рівнів завантаження дільниці, зокрема для розмірів руху, що відповідають режиму вільного руху поїздів (нормативний ГРП); рівню завантаження близько 80 % від максимального; максимальному рівню завантаження, що відповідає наявній пропускній спроможності залізничної дільниці або наближеній до неї. При моделюванні для кожного з рівнів завантаження приймаються однакові умови слідування через дільницю всіх поїздів (як правило, $n_{пс}, n_{пр}, n_{зб}$), у яких швидкісний режим відрізняється від швидкості поїздів, за якими визначається наявна пропускна спроможність.

Розрахунок кількості вантажних поїздів на дільницях з переважним вантажним рухом в умовах непаралельного графіка, що відповідає прийнятому рівню виконання графіка руху поїздів, визначається за виразом $n_{ван}^{пратк} = n^{пратк} - (n_{пс} + n_{пр} + n_{зб})$, де $n_{пс}$, $n_{пр}$, $n_{зб}$ – кількість поїздів (пар поїздів) різних категорій відповідно до прийнятих умов експлуатації дільниці (дана кількість поїздів повинна відповідати початковим умовам моделювання затримок).

Для прикладу у роботі знайдені залежності коефіцієнта готовності $\alpha_{експл}$ від кількості поїздів та прийнятого рівня виконання $p(n)$ на дільниці Колосівка – Одеса-Сортувальна. Номограми отриманих залежностей наведені на рис. 10. Знайдена практична пропускна спроможність для дільниці Колосівка – Одеса-Сортувальна не суперечить реальним умовам експлуатації дільниці відповідно до експериментальних даних та виявлених аналітичних залежностей. Аналіз номограм на рис. 10,а-г свідчить про існування фазового переходу між режимами руху поїздопотоків на дільниці. Так, на номограмах з рис. 10,в-г спостерігається розрив між заданою надійністю ГРП у 90 % з нижчими рівнями (заштрихована ділянка на рис. 10,в), що свідчить про різкий перехід від режиму вільного руху поїздів до стану синхронізованого потоку.

Застосування розробленого методу для встановлення більш точних значень величини пропускної спроможності поїздодільниць відповідно до їх класифікації інфраструктури дозволяє реалізувати процес розподілу пропускної спроможності залізничної мережі, що відповідає реальним експлуатаційним умовам роботи.

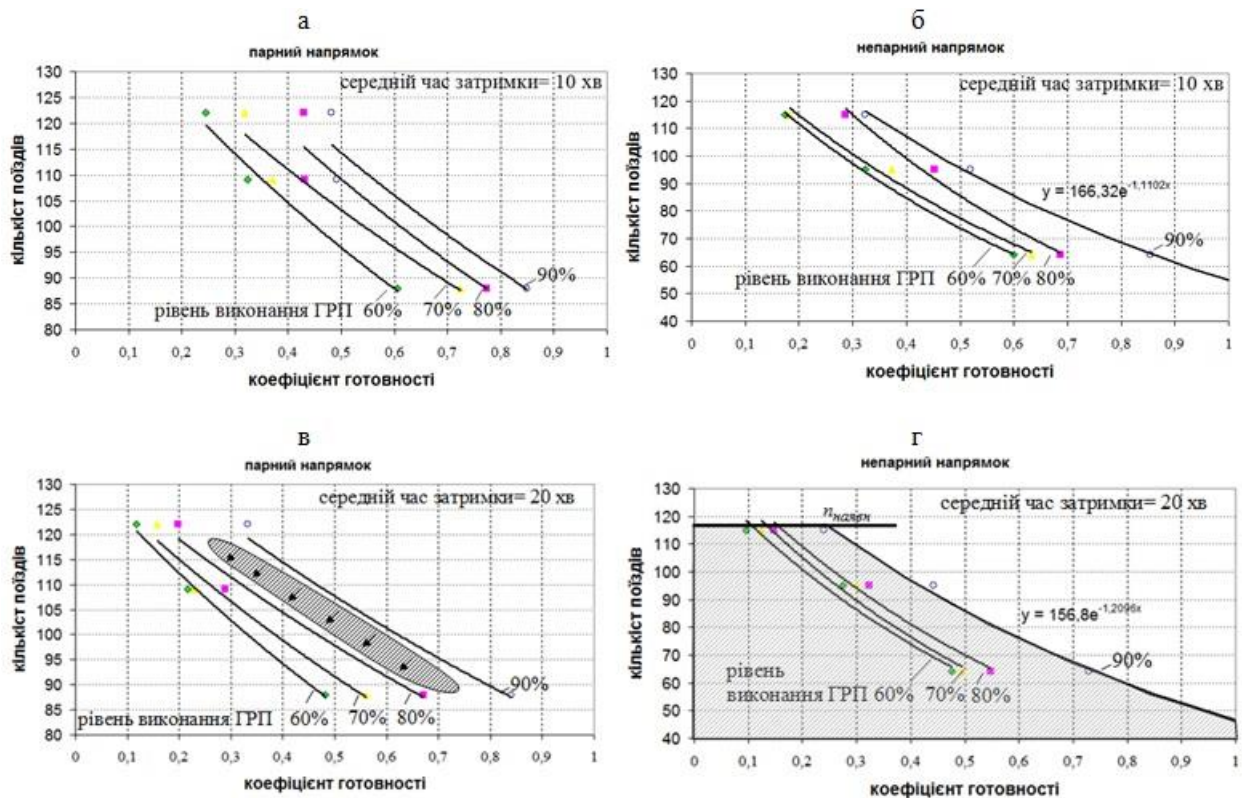


Рис. 10. Залежність коефіцієнта готовності від кількості поїздів та прийнятого рівня виконання графіку руху поїздів на дільниці Колосівка – Одеса-Сорт.: а) у парному напрямку при середньому часі затримки 10 хв; б) у непарному напрямку при середньому часі затримки 10 хв; в) у парному напрямку при середньому часі затримки 20 хв; г) у непарному напрямку при середньому часі затримки 20 хв

У п'ятому розділі формалізовано процес функціонування залізничної мережі в умовах існування різних варіантів режимів руху і доступу до залізничних дільниць на основі математичної моделі розподілу пропускної спроможності залізничної мережі з урахуванням принципів самоорганізації.

На основі проведеного аналізу сучасного стану досліджень у галузі проблем проектування транспортних мереж запропоновано для пошуку нових форм управління розподілом пропускної спроможності залізничної мережі застосувати принцип побудови математичної моделі на основі формування макрохарактеристик залізничної системи, що визначаються шляхом висхідного процесу взаємодії компонентів системи за простими правилами, що призводить до виникнення ієрархії, яка є наслідком існування самоорганізації в системі.

Розроблено підхід до розв'язання математичної моделі розподілу пропускної спроможності залізничної мережі на основі мультидисциплінарної оптимізації (англ., multi-disciplinary design optimization, MDO), коли на глобальному рівні оптимізації з використанням генетичного алгоритму визначаються різні варіанти режимів руху на дільницях мережі і доступу до них за критерієм мінімізації витрат на експлуатацію мережі та досягнення раціонального розподілу пропускної спроможності мережі, тоді як за мультиагентним підходом за допомогою алгоритму мурашиних колоній виконується маршрутизація поїздопотоків у межах визначеної пропускної спроможності та встановлених вартостей доступу за локальними

критеріями (мінімізація вартості проїзду або мінімізація тривалості проїзду), що встановлюють компанії-перевізники.

Для реалізації глобальної динаміки в системі організації поїздопотоків та утворення топології мережі на основі поділу руху за видами перевезень та гармонізації швидкостей руху запропоновано формалізувати процес функціонування залізничної мережі в умовах концентрації основних обсягів вантажного, пасажирського, транзитного руху на спеціалізованих дільницях. Враховуючи необхідність декомпозиції розгалуженої залізничної мережі за транспортно-експлуатаційними якостями і споживчими властивостями, в роботі запропоновано використати концепцію ієрархічного представлення мережі, що дозволяє розглядати сітьову структуру мережі у вигляді чотирьох рівнів функціонування ($l = \overline{1,4}$): змішаний рух, ($l = 1$); переважно вантажний рух, ($l = 2$); переважно пасажирський рух, ($l = 3$); магістральні напрямки, або транспортні коридори, клас В ($l = 4$), які утворюють на верхньому рівні мережі сітьову структуру для обслуговування системних транзитних перевезень інтенсивного руху.

Запропоновану багаторівневу структуру функціонування залізничної мережі можна подати у вигляді багатошарового графу $G(D, V, E)$ з множиною підграфів $D = \{D_0, D_1, D_2, \dots, D_l\}$, $D_l = (V, E_l)$ – підграф, що описує структуру мережі на рівні функціонування l , тоді вершини графу $v^k \in V$, $k \in K$ являють собою стовбурову структуру, до якої на різних рівнях примикають дуги, що описують існування відповідного виду перевезень. Нижнім шаром графу $G(D, V, E)$ є підграф $D_{l=0} = (V, E_{l=0})$, що описує рівень фізичної топології мережі або інфраструктуру мережі. Вершини V підграфа $D_{l=0}$ відповідають вузлам фізичної мережі, тобто залізничним станціям, які є обмежуючими для утворення поїздодільниці. Під топологічним ребром $e_{l=0}^{ij} \in E_{l=0}$, $ij \in n$ слід розуміти поїздодільницю, що характеризується приблизно однаковими умовами експлуатації. Міжрівневий зв'язок між підграфами запропоновано описати вертикальними ребрами e_{lm}^k , що проектується в точку на проекції вершин фізичного підграфу, де l та m – індекси, що описують відповідно нижній і верхній рівні багатошарового графу $G(D, V, E)$, k – номер вершини фізичного підграфу, що є стовбуром графу G . Для моделювання різних варіантів функціонування поїздодільниці для кожного ребра шару $l = 0$ підграфу $D_{l=0}$ введено змінну функцію

$$\delta_{l=0}^{ij} = \begin{cases} 1, & \text{змішаний рух, (категорія 1),} \\ 2, & \text{переважно вантажний рух, (категорія 1),} \\ 3, & \text{переважно пасажирський рух (категорія 2).} \end{cases}$$

Відповідно до особливостей застосування для багаторівневої структури функціонування залізничної мережі у вигляді графу G реалізована потокова модель. В межах потокової моделі сформовані обмеження на збереження потоків у мережі.

Через f^{st^r} позначено інтенсивність поїздопотому r -того типу із станції-джерела v^s ($s = \overline{1, w}$) у станцію-стік v^t ($t = \overline{1, w}$), а через x_l^{ij, st^r} – поїздопотік по ребру e_l^{ij} , що відповідає кількості поїздів r -того типу із v^s у v^t , які прямують із v^i у v^j в підграфі рівня l ($r=1$ – потік пасажирських поїздів; $r=2$ – потік вантажних поїздів). Тоді величину поїздопотому, що проходить по вертикальних ребрах e_{lm}^k , можна записати як x_{lm}^{k, st^r} . Маршрут поїзда $\mu_{<s,t>}^r$ від пункту відправлення s до пункту призначення t є впорядкованою множиною ребер: $\mu_{<s,t>}^r = (e_l^{s_i}, \dots, e_l^{ij}, \dots, e_l^{jt})$, $\forall e_{l,l>0}^{ij} \in \mu_{<s,t>}^r$. Вище викладений опис структури функціонування залізничної мережі у вигляді багат шарового графу наведено на рис. 11.

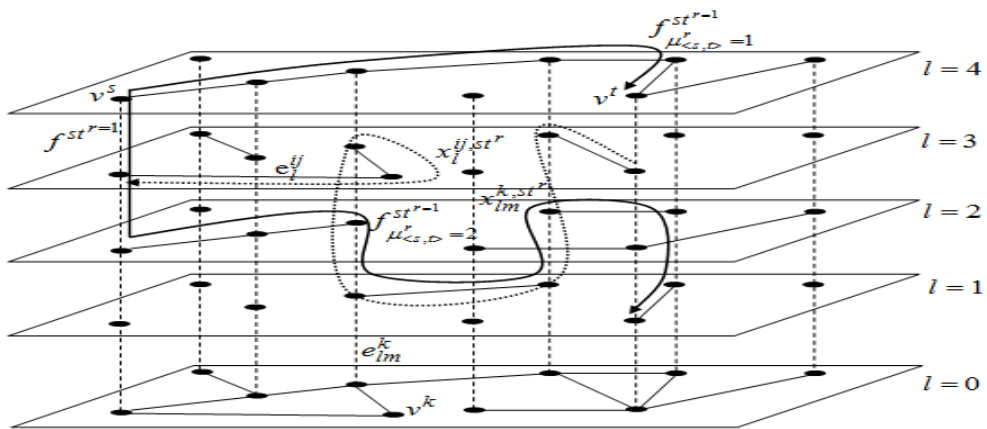


Рис. 11. Структура функціонування залізничної мережі у вигляді багат шарового графу $G(D, V, E)$

Для опису можливостей інфраструктури залізничної мережі в процесі моделювання розроблено процедуру розподілу пропускної спроможності відповідно до змодельованого режиму експлуатації $\delta_{l=0}^{ij}$ дільниці по кожному підграфі $D_l = (V_l, E_l)$, $l = \overline{1, 3}$, що описує лінійний рівень функціонування мережі. Дана процедура передбачає на початковому етапі встановлення відповідно до режиму експлуатації частки наявної пропускної спроможності дільниці за видом перевезень (пасажирські і вантажні). Після визначення максимальної кількості поїздів різних категорій на топологічному ребрі $e_{l=0}^{ij}$ проводиться уточнення пропускної спроможності, яка може бути реально реалізована на основі розрахунку практичної пропускної спроможності $n_{\text{практ}}^{ij}$ відповідно до розробленого методу у розділі 4.

Для встановлення на рівні магістралі $\zeta_{l=4}^{ij} = 1$ теоретично обґрунтованої частки пропускної спроможності (кількості ниток ГРП) $N_{l=4, \text{слот}}^{ij, r}$, яку можливо виділити для пропуску спеціалізованих поїздів на магістральному напрямку, запропоновано удосконалити метод, що дозволяє врахувати технічні і технологічні особливості пропуску спеціалізованих вантажних поїздів підвищеної маси та довжини за

жорстким розкладом руху. По суті, за кожним формалізованим варіантом розподілу поїздопотоків за рівнями функціонування мережі виконується умовне розбиття загальної пропускної спроможності дільниці на ділянки – “слоти” пропускної спроможності відповідно до режиму функціонування дільниць, магістральних напрямків та типів поїздопотоків, що прослідують через них (рис. 12).

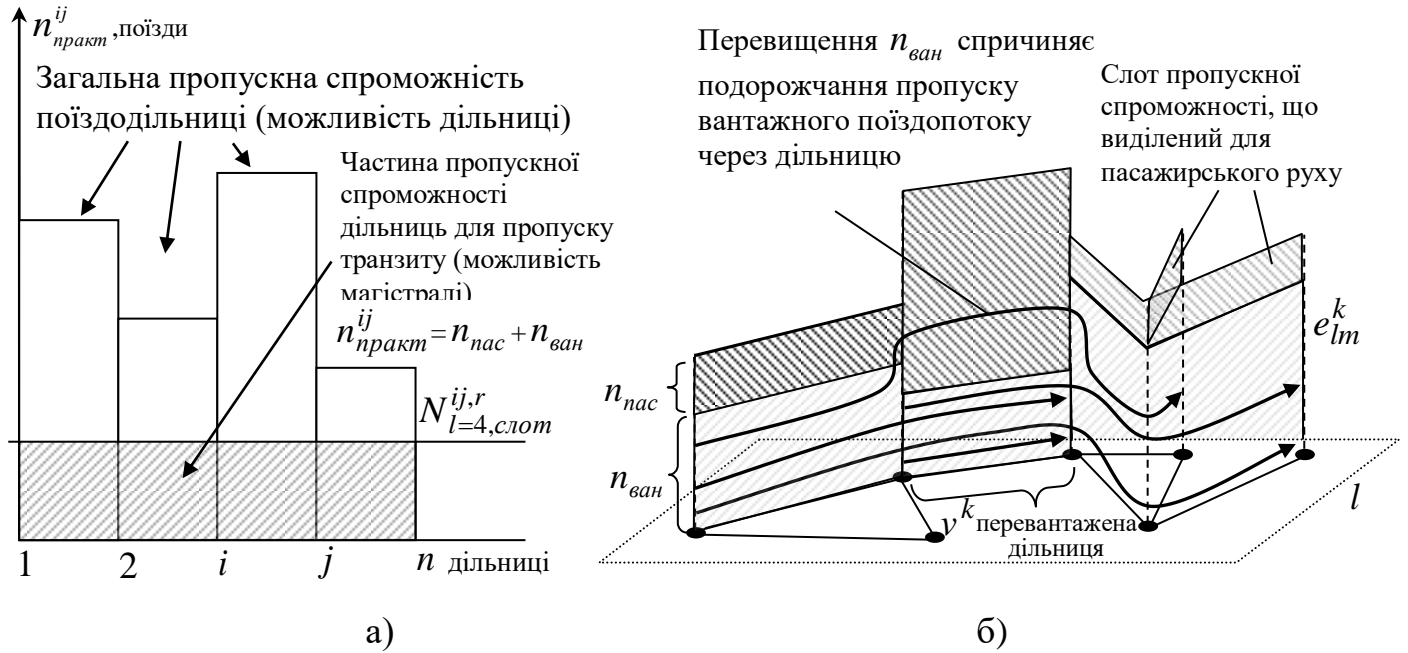


Рис. 12. Ілюстрація процедури розподілу та використання пропускної спроможності: а) діаграма розподілу пропускної спроможності залізничної інфраструктури в умовах її декомпозиції на дільниці і напрямки; б) візуалізація правила використання слотів пропускної спроможності на дільницях

Відповідно до запропонованого підходу побудови математичної моделі розподілу пропускної спроможності залізничної мережі розроблено глобальний критерій оцінки ефективності перевізного процесу в умовах розділення функцій управління інфраструктурою та здійснення експлуатаційної діяльності

$$F = \sum_r \sum_{s,t} \sum_{l,l>0} \sum_i \sum_j C_{l=\delta_{l=0}}^{ij,r} x_l^{ij,st^r} Dist_{ij} + \sum_{s,t} \sum_{l,l>0} \sum_i \sum_j Cp_{ij} \max \left\{ 0, \left(N_{наявна}^{ij,r} - \sum_r x_l^{ij,st^r} \right) \right\} + \sum_{s,t} \sum_{l,l>0} \sum_i \sum_j Cd_{ij} \max \left\{ 0, \left(\sum_r x_l^{ij,st^r} - N_{наявна}^{ij,r} \right) \right\} \rightarrow \min, \quad (5)$$

де $C_{l=\delta_{l=0}}^{ij,r}$ – одинична витратна ставка вартості поїздо-кілометра, що залежать від режиму функціонування дільниць та типу поїздопотоків, грн/поїздо.км; $Dist_{ij}$ – довжина топологічного ребра $e_{l=0}^{ij}$ або дільниці, км; Cp_{ij} – одинична витратна ставка вартості слідування поїзда через дільницю в умовах недозавантаження залізничної дільниці, грн/поїзд; $N_{слот}^{ij,r}$ – величина слоту пропускної спроможності, що виділена для пропуску r -го типу поїздопотоків, поїздів; Cd_{ij} – одинична

витратна ставка вартості слідування поїзда через дільницю в умовах перевантаження (втрати через дефіцит пропускної спроможності), грн/поїзд. У загальному вигляді математична модель розподілу пропускної спроможності залізничної мережі має глобальний критерій (3) та класичні обмеження: на збереження потоків у вузлах; на пропускну спроможність дільниць та вимогу на необхідність виконання всіх заявок.

Для запуску механізму самоорганізації в межах загальної оптимізації на кожному кроці після встановлених режимів руху на поїздодільницях мережі моделюється діяльність автономних агентів (компаній-перевізників), які в межах визначеної пропускної спроможності та встановлених вартостей доступу здійснюють пошук маршруту слідування свого поїздопотоку за індивідуальним критерієм відповідно до власних економічних потреб. Таким чином, кожен агент формує свій запит на доступ до залізничної інфраструктури (показує свою бажану схему направлення поїздопотоку), тоді як в межах загального середовища всі поїздопотоки оцінюються в цілому за глобальним критерієм (3) і в подальшому за результатами оцінки ефективності в моделі змінюються режими руху $\delta_{l=0}^{ij}$ на поїздодільницях для більш раціонального пристосування до запитів компаній-перевізників. Для моделювання кожного з агентів застосовано уніфікований підхід, за яким задача маршрутизації поїздопотоку в залізничній мережі кожним з агентів a , $a \in A$, де A – множина компаній-перевізників відповідає класичній задачі пошуку потоку мінімальної вартості. Причому постановка даної задачі є однаковою, лише змінюється критерій оптимізації. Вирішується дана задача маршрутизації з використанням алгоритму мурашиних колоній (англ., Ant Colony Algorithms for Continuous Optimization, ACO_R). Для відображення інтересів перевізників запропоновано врахувати два види компаній перевізників (агентів) у сфері вантажних перевезень та одного виду компаній у сфері пасажирських перевезень.

Перший вид агента $a = 1$ відповідає компаніям, що за своєю бізнес-моделлю здійснюють маршрутизацію поїздопотоку за критерієм мінімізації витрат та бажаного дотримання строків доставки вантажу за укладеними контрактами. Для агента $a = 1$ математична модель з маршрутизації має цільову функцію вигляду

$$F_{local}^{a=1} = \sum_{s,t} \sum_{l,l>0} \sum_i \sum_j C_{l=\delta_{l=0}^{ij}}^{ij,r} x_l^{ij,st^r} Dist_{ij} + C_{штраф}^r \sum_{s,t} \max\{0, T_{min}^{st^r} - t^{st^r}, t^{st^r} - T_{max}^{st^r}\} \rightarrow \min, \quad (6)$$

та обмеження

$$\sum_{l,l>0} \sum_i x_l^{ij,st^r,a} - \sum_{l,l>0} \sum_u x_l^{ju,st^r,a} = \begin{cases} -f^{st^r,a}, & \text{якщо } j = s, \\ 0, & \text{якщо } j \neq s, t, \\ f^{st^r,a}, & \text{якщо } j = t. \end{cases} \quad (7)$$

$$0 \leq x_l^{ij,st^r,a} \leq N_{l,слот}^{ij,r}, \quad (8)$$

де $C_{path_{l=\delta_{l=0}^{ij}}}^{ij,r,a}$ – вартість одного поїздо-кілометра, що встановлюється

відповідно до $\delta_{l=0}^{ij}$ режиму руху та умов доступу на дільниці ij , грн; $C_{штраф}^{r,a}$ – вартість

штрафу за недотримання строку прибуття поїзда, грн/год; $T_{min}^{st^r}, T_{max}^{st^r}$ – встановлені нормативні межі тривалості слідування поїздопотоків типу r між пунктами s і t тобто $T_{min}^{st^r,a} \leq t^{st^r,a} \leq T_{max}^{st^r,a}$, год; $t^{st^r,a}$ – час слідування поїздопотоків типу r від s до t , що належить компанії a , год; $\sum_{l,l>0} \sum_i x_l^{ij,st^r,a}$, $\sum_{l,l>0} \sum_u x_l^{ju,st^r,a}$ – відповідно перший і другий операнд відповідає сумі всіх поїздів за всіма ребрами i , u та рівнями l графу $G(D,V,E)$, що належать компанії-перевізнику та відповідно є входними і вихідними потоками у вузол v^k ; $N_{l,slot}^{ij,r}$ – виділена величина слоту пропускної спроможності на кожному з ребер e_l^{ij} для підграфа рівня l , ниток ГРП.

Другий вид агента $a=2$ відповідає значній кількості невеликих та середніх компаній-перевізників, що спеціалізуються в основному на відправках вантажів з вимогою швидкого перевезення. За таких умов математична модель з маршрутизації має обмеження (7-8) та цільову функцію, яка мінімізує час слідування поїздопотоків

$$F_{local}^{a=2} = \sum_{l,l>0} \sum_i \sum_j t_{l,l>0}^{ij,r,a} \gamma_{l,l>0}^{ij,st^r,a} + \sum_{l,l>0} \frac{S_{l,l>0}^{st^r,a}}{I_{l,l>0}^{mexr,a}} t_{mex} + \sum_k \gamma_{l,m}^{k,st^r,a} t_{lm}^{k,st^r,a} \rightarrow \min, \quad (9)$$

де $\gamma_{l,l>0}^{ij,st^r,a}$ – функція, що набуває одиничного значення у випадку проходження поїздопотоків відповідно по дільниці ij та вертикальному ребру e_{lm}^k та нуль в іншому випадку; $S_{l,l>0}^{st^r}$ – час слідування поїздопотоків st по підграфу рівня l , год; $I_{l,l>0}^{mexr}$ – середній час між зупинками поїзда на технічних станціях підграфу рівня l , що залежить від прийнятої довжини пліч роботи локомотивів та лок.,бригад, год; t_{mex} – середній простій состава на технічній станції, год; t_{lm}^{k,st^r} – час очікування поїздом “нитки” графіка на станції k для відправлення на дільницю з іншим режимом руху, год.

Для маршрутизації пасажирських поїздопотоків запропоновано використати один вид компаній-перевізників ($a=3$), у яких критерієм пошуку маршруту поїзда в мережі є мінімізація витрат та бажаного дотримання мінімальних строків знаходження пасажирів на шляху прямування. Математична модель формулюється аналогічно постановці для агента першого виду.

Для підвищення пропускної спроможності мережі та живучості системи організації перевезень в роботі запропоновано мережевій структурі організації поїздопотоків надати властивостей, що характерні так званим заплутаним мережам (англ., entangled network). Досягається це на основі максимізації значення алгебраїчної зв'язності λ_2 (англ., algebraic connectivity), що є другим власним значенням лапласіана графу $P(V,E)$, що описує маршрути поїздопотоків у графі $G(D,V,E)$. Лапласіан графу визначається як $L=D-A$, де D – діагональна матриця

вузлових ступенів; A – матриця суміжності для графу $A = [a_{ij}]$, $i, j = \overline{1, n}$. Впорядковані власні значення $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ лапласіана L (або графу P) визначають лапласіан спектр, або спектр графа

$$2d_{\max} \geq \lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{n-1} \geq \lambda_n = 0, \quad (10)$$

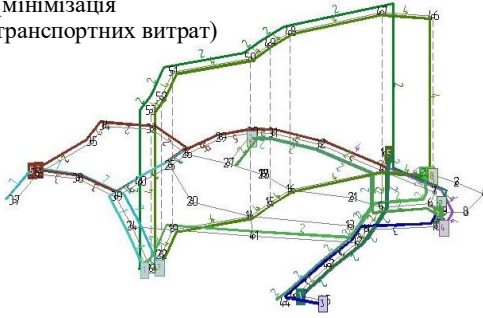
де d_{\max} – це максимальний ступінь вершин графу; λ_1 – перше найменше власне значення; λ_2 – друге найменше власне значення лапласіана, чи алгебраїчний зв'язок. Спираючись на вплив максимізації величину λ_2 на спектральний розрив графу $g(P)$, відповідно до виразу $g(P) = \lambda_1 - \lambda_2$, що є мірою спектрального розширення графу в роботі запропоновано в межах оптимізаційної задачі застосувати алгебраїчну зв'язність графу P як другий конкурентний критерій, що оцінює глобальну міру покращення використання пропускної спроможності залізничної мережі з урахуванням підвищення живучості структури системи організації поїздопотоків, який з економічної точки зору виражає отримання додаткового прибутку від пропуску всіх заявлених поїздів без перевантаження дільниць на мережі. За таких умов постановка задачі оптимізації перетворюється на багатокритеріальну оптимізацію з тими самими обмеженнями, як і для критерію (5), зокрема на збереження потоків у вузлах, на пропускну спроможність дільниць та вимогу на необхідність виконання всіх заявок. Для її розв'язання запропоновано використати метод лінійного згортання критеріїв, який полягає в лінійному об'єднанні критерію F_1 , що аналітично записується, згідно з виразом (5), з критерієм $F_2 = \lambda \rightarrow \max$, шляхом введення вагових коефіцієнтів. Отже, глобальний критерій можна переписати, як

$$F_{global} = \alpha_1 F_1^* - \alpha_2 F_2^* \rightarrow \min, \quad (11)$$

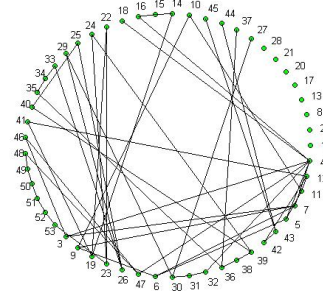
де α_1, α_2 – вагові коефіцієнти, $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$; F_1^*, F_2^* – нормовані значення критеріїв відповідно F_1 та F_2 .

Результати розв'язання математичної моделі розподілу пропускної спроможності залізничної мережі за різними комбінаціями вагових коефіцієнтів у критерію F_{global} наведені на рис. 13. Експериментальні дослідження довели ефективність впливу максимізації глобальної міри спектрального розширення графової структури маршрутизації поїздопотоків на розподіл пропускної спроможності у мережі та встановили більш прийнятним застосування урівноваженого критерію F_{global} (рівновага між F_1 та F_2). Розроблений підхід на основі застосування спектральної теорії графів надає можливість створити математичну модель реалізації перевізного процесу з урахуванням утворення зворотного зв'язку між структурою і динамікою перевізного процесу, що відбуваються в мережі.

Оптимізація за F_1
(мінімізація
транспортних витрат)



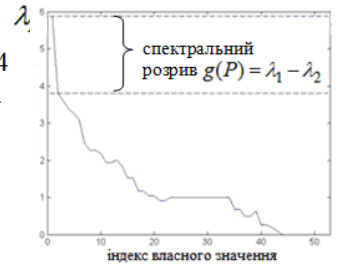
algebraic connectivity is 3.804, smooth diameter is 24, ave path length is 9.5041



$$\lambda_2 = 3,804$$

$$d_{\max} = 24$$

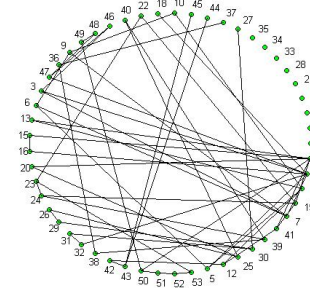
$$l = 9,504$$



Перевага F_2 над F_1
(максимізація зв'язності)



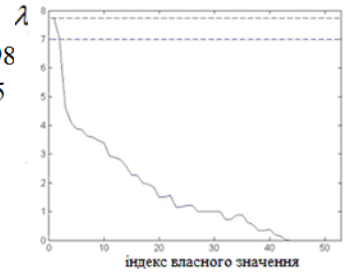
algebraic connectivity is 6.9975, smooth diameter is 15, ave path length is 5.7922



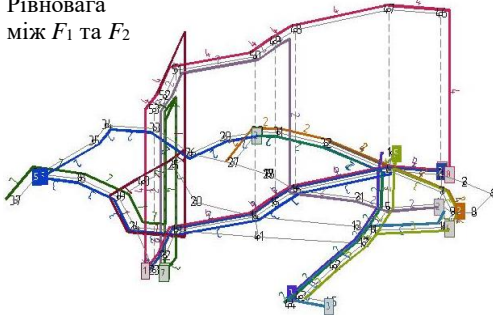
$$\lambda_2 = 6,998$$

$$d_{\max} = 15$$

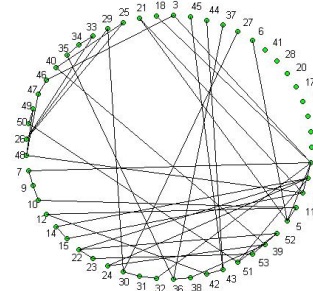
$$l = 5,792$$



Рівновага
між F_1 та F_2



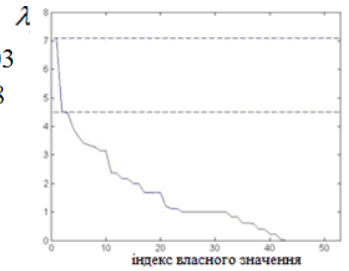
algebraic connectivity is 4.503, smooth diameter is 18, ave path length is 7.0073



$$\lambda_2 = 4,503$$

$$d_{\max} = 18$$

$$l = 7,007$$



а

б

в

Рис. 13. Візуалізація результатів моделювання: а) графової структури маршрутизації поїздопотоків P у вигляді ієрархічної структури; б) P у вигляді довільного кругового графу з вершинами, відсортованими за показником ступеня; в) візуалізація власних значень лапласіан графу P , відсортованих за спаданням

Шостий розділ присвячено формуванню вимог до автоматизованої системи управління розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури (АСУ ПС) на базі розподіленої системи підтримки прийняття рішень (СППР) для вирішення комплексу задач планування перевезень від подачі заявки на організацію маршруту до розподілу поїздопотоків, розробки нитки ГРП та його аналізу.

Проаналізовано етапи планування організації перевезень залізниць в умовах недискримінаційного доступу до залізничної інфраструктури незалежних компаній-перевізників. Встановлено, що процес управління розподілом пропускної спроможності є трудомістким, складається з багатьох етапів планування, потребує великої кількості інформаційних даних щодо технічних і технологічних характеристик інфраструктури. Це вимагає створення нової автоматизованої системи, яка дозволить поєднати в межах одного інформаційного середовища вже існуючі бази даних та автоматизовані системи управління на залізницях України для вирішення управління на тактичному та оперативному рівнях.

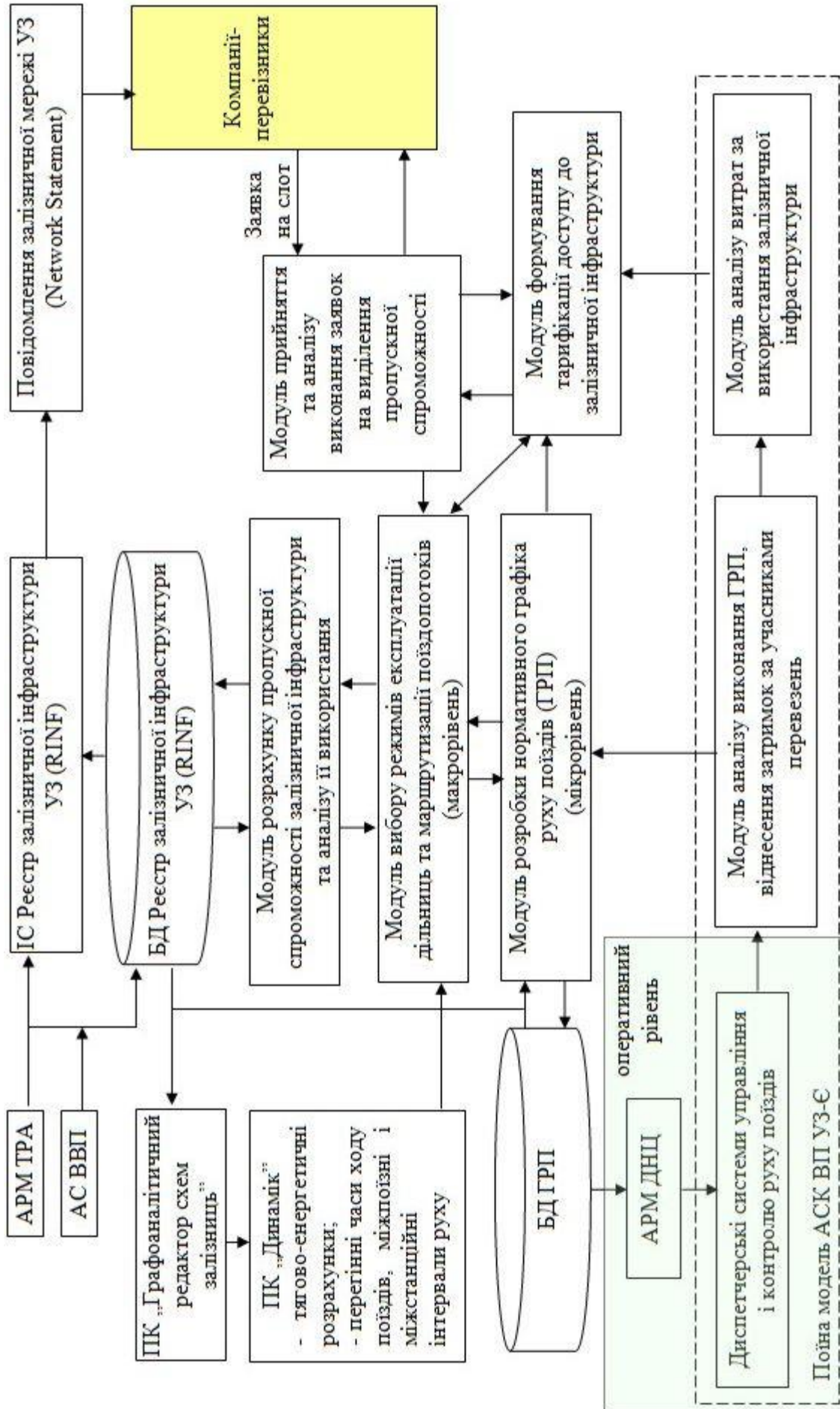


Рис. 14. Функціональна схема АС управління розподілом пропускної спроможності

Визначено сутність та компоненти автоматизованої системи управління розподілом пропускної спроможності залізничної мережі України. Запропоновано реалізувати АСУ ПС у вигляді модульної структури. Кожен компонент системи повинен виконувати окрему функцію в межах загального процесу управління та бути інтегрованим до єдиного сітьового середовища для формування комплексної технології управління розподілом пропускної спроможності мережі залізниць України. Складність процесів виконання кожної з функцій вимагає підтримки інтерактивного режиму вирішення поставлених задач планування у кожному з модулів АС, що дозволить підвищити гнучкість та достовірність їх вирішення. Для надання розширеної функціональності компонентам АСУ ПС запропоновано реалізувати розподілену СППР на основі архітектури клієнт-сервер з Rich-клієнтом.

Враховуючи організаційну структуру управління залізничною інфраструктурою, яка є ієрархічною та просторово рознесеною за регіонами залізничної мережі України, прийнятною є реалізація розподіленої архітектури СППР. Схема інтегрування компонентів у систему АСУ ПС наведена на рис. 14. Розроблено ескізи графічних інтерфейсів для запропонованих модулів АСУ ПС.

Відповідно до проведеного аналізу основних функцій, що виконуються відділами в складі Департаменту управління перевезень УЗ, розроблена структурна схема функціонування розподіленої СППР на основі ієрархічного підходу узгодження та затвердження технологічного процесу розподілу пропускної спроможності залізничної інфраструктури. Запропоновано розмістити СППР, в межах якої функціонує комплекс розроблених в дисертаційній роботі математичних моделей, на АРМ інженерів у відділі технології перевезень та у відділі розробки і аналізу графіка руху поїздів.

Для підтвердження ефективності впровадження розробленої СППР в межах єдиного середовища АСУ ПС в частині реалізації запропонованих методів і моделей виконано економічне обґрунтування.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну проблему управління розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури в умовах недискримінаційного доступу на основі формування методів, які передбачають відмову від централізованого управління та впровадження принципу управління, що стає внутрішньою функцією системи на основі появи самоорганізації. Це дозволить підвищити ефективність функціонування залізничного транспорту України в умовах недискримінаційного доступу до залізничної інфраструктури. Основні наукові та практичні результати роботи можна узагальнити в таких висновках:

1. Проведений аналіз тенденцій розвитку ринку вантажних перевезень на залізницях світу свідчить про успішне застосування транспортно-логістичних технологій, при яких величина тарифу на перевезення і надійність часу прибуття в пункт призначення в цілому є найбільш важливими факторами, що визначають якість транспортної послуги. Аналіз існуючого стану залізничного транспорту України показав невідповідність рівня якості транспортної послуги встановленим вимогам на глобальному ринку перевезень. На залізницях України наявна значна зношеність основних фондів, а технології перевезень не дозволяють забезпечити

точність перевезень вантажів. Аналіз інтенсивності використання залізничної мережі свідчить про дефіцит інфраструктури, яка використовується нерівномірно з причин направлення вагонопотоків за найкоротшими (тарифними) відстанями.

2. Проведений аналіз наукових досліджень у галузі проблем управління розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури довів, що в теорії експлуатації залізниць пострадянської наукової школи великого значення даній проблемі не приділялось, а існуючі підходи до вирішення даної проблеми на залізницях різних країн світу не відповідають експлуатаційним особливостям залізничного транспорту України і, як наслідок, їх застосування є обмеженим. Закладення в існуючих математичних моделях для залізниць України припущення централізованого управління в межах єдиної національної залізничної системи не відповідає умовам розподілу функцій управління при утворенні великої кількості операторів-перевізників, які реалізують перевізну діяльність залізничного транспорту та конкурують за доступ до залізничної інфраструктури, якою монополює оператор сільовий оператор. Сучасний розвиток теорії експлуатаційної роботи залізниць повинен ґрунтуватися на квазістохастичному розумінні поняття залізничної транспортної системи, що у свою чергу передбачає можливість здійснення управління її пропускною спроможністю. При цьому вирішення проблеми управління розподілом пропускної спроможності вимагає комплексного підходу з інтеграцію етапів планування від подачі заявки до розподілу пропускної спроможності залізничної інфраструктури, контролю за її використанням та аналізу.

3. На основі аналізу властивостей системи просторової організації вагонопотоків в поїзди на мережі залізниць України статистично доведена гіпотеза підпорядкування емпіричного розподілу ступеня вершин графу мережі призначень ПФП степеневому закону (англ., Zipf's law). Дослідження показали, що розподіл вхідних ступенів підпорядковується степеневому закону з константою ~ 2.34 , вихідних ступенів – з константою ~ 2.07 , загальних ступенів – з константою ~ 1.9 . Додаткові дослідження властивостей живучості мережі призначень ПФП на основі теорії перколяції вузлів дозволили виявити існування властивості самоподібності перколяційного кластера. Доведення існування в графі призначень ПФП властивості масштабної інваріантності дозволяє підтвердити статистичну гіпотезу та віднести мережу до класу масштабно-інваріантних мереж. Виявлена властивість масштабної інваріантності в мережі призначень ПФП спростовує розподіл зв'язків за законом Пуассона. Отже, граф мережі призначень ПФП не є випадковим, а його розвиток лежить в основі процесів самоорганізації складних нелінійних систем.

4. Сформульовано концептуальний підхід до управління розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури на основі досліджень у галузі проблем організованої складності. Запропоновано при розробці методів управління розподілом пропускної спроможності залізничної мережі України застосувати концептуальний підхід, що передбачає відмову від централізованого управління зверху вниз та впровадження принципу управління розподілом пропускної спроможності, який стає внутрішньою функцією системи на основі властивості самоорганізації. Це вимагає на тактичному рівні управління розробити систему класифікації залізничних дільниць і напрямків для експлуатаційної діяльності, сформулювати більш точний метод оцінки пропускної спроможності

залізничних дільниць та реалізувати математичну модель для пристосування режимів руху до вимог транспортного ринку на основі принципів самоорганізації.

5. Розроблено метод класифікації залізничних дільниць і напрямків для експлуатаційної діяльності, який, на відміну від існуючих, дозволяє за такими критеріями, як: швидкість руху, вантажонапруженість, технічне оснащення дільниць, витрати людино-годин за поїздом, розмірами руху поїздів, рівнем виконання ГРП поділити дільниці за транспортно-експлуатаційними якостями і споживчими властивостями та призначений для формування системи оцінок можливостей залізничної інфраструктури і, як наслідок, підвищення ефективності управління розподілом пропускної спроможності інфраструктури залізничної мережі України.

6. Для дослідження процесів взаємовпливу поїздів в умовах зміни експлуатаційної надійності дільниці отримані результати моделювання відмов, що свідчать про значний вплив вторинних затримок на експлуатаційну надійність графікової технології. Встановлено, що для двоколійної дільниці навіть в стані вільного руху поїздопотоків за варіантами середньої затримки 10, 20 та 30 хвилин у середньому частка первинних затримок складає 40 % від загального часу затримок у ГРП, тоді як відповідно частка часу вторинних затримок складає у середньому 60 %. В умовах перевантаження дільниці ситуація змінюється, а саме – за аналогічними варіантами середньої затримки частка первинних затримок складає лише 10 % від загального часу затримок у ГРП, тоді як відповідно частка часу вторинних затримок складає у середньому 90 %. Результати моделювання показують значну вразливість експлуатаційної роботи в умовах перевантаження дільниці, так час первинної затримки у 5 хвилин у максимальному графіку руху поїздів призводить до вторинної затримки загальною тривалістю у 507 хвилин. Вплив зміни завантаження залізничної дільниці на її експлуатаційну надійність є дуже високим, що доводить необхідність врахування даного фактора при визначенні пропускної спроможності. Для врахування експлуатаційної надійності при розрахунку пропускної спроможності залізничної інфраструктури запропоновано в умовах України, згідно зі світовою практикою, використовувати, такий вид пропускної спроможності, як практична пропускна спроможність.

7. Проведені експериментальні дослідження в умовах дільниць Колосівка – Одеса-Сортувальна та Помічна – Колосівка Одеської залізниці дозволили отримати експоненційну спадну залежність коефіцієнту готовності від кількості поїздів та прийнятого рівня надійності графікової технології на дільниці.

8. Розроблено метод розрахунку практичної пропускної спроможності залізничної інфраструктури, який, на відміну від існуючих, дозволяє врахувати експлуатаційну надійність системи перевезень та підвищити точність оцінки раціональних меж завантаження дільниці. Даний метод ґрунтується на дослідженні надійності графіка руху поїздів на основі моделювання двох видів затримок поїздів: первинні затримки, які викликані випадковими факторами через збої в роботі підсистем дільниці; вторинні затримки, які виникають з причин первинної затримки першого поїзда та послідовного порушення розкладу руху інших поїздів, які опинилися в зоні слідування затриманого поїзда.

9. Формалізовано процес функціонування залізничної мережі в умовах спеціалізації інфраструктури на основі математичної моделі розподілу пропускної спроможності залізничної мережі з урахуванням принципів самоорганізації, яка дозволяє пристосувати режим експлуатації інфраструктури залізничної мережі до умов транспортного ринку з урахуванням досягнення раціонального розподілу пропускної спроможності мережі та підвищення показників живучості системи просторової організації поїздопотоків за рахунок покращення спектральних властивостей мережевої топології їх маршрутів.

10. Експериментальні дослідження довели ефективність впливу максимізації глобальної міри спектрального розширення графової структури маршрутизації поїздопотоків на розподіл пропускної спроможності у мережі. Це доводить ефективність впровадження розробленого підходу до управління пропускної спроможності залізничної інфраструктури на основі принципів самоорганізації та важливість пристосування режимів експлуатації інфраструктури залізничної мережі до вимог користувачів з боку компанії, що управляє залізничною інфраструктурою. Розроблений підхід на основі застосування спектральної теорії графів надає можливість створити математичну модель функціонування залізничної інфраструктури з урахуванням утворення зворотного зв'язку між структурою і динамікою перевізного процесу, що відбуваються в мережі.

11. Розроблено вимоги до формування автоматизованої системи управління розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури (АСУ ПС) на базі розподіленої системи підтримки прийняття рішень (СППР) для реалізації комплексу задач планування перевезень від подачі заявки на організацію маршруту до розподілу пропускної спроможності, розробки нитки графіка руху поїздів та аналізу реалізації перевізного процесу.

12. Економічне обґрунтування запропонованих заходів доводить, що після впровадження розподіленої СППР в межах єдиного середовища АСУ ПС в частині реалізації запропонованих методів і моделей прогнозна економічна ефективність з наростаючим підсумком від впровадження запропонованої системи на залізницях України за період 2016-2020 рр. становить близько 1,39 млрд грн, дільнична швидкість збільшиться на 1,5 %, час затримок поїздів скоротиться на 5 %.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні наукові праці:

1. Бутько, Т.В. Формування моделі розвитку залізничної системи швидкісних перевезень на основі принципів самоорганізації / Т.В. Бутько, А.В. Прохорченко, Л.О. Пархоменко, І.В. Копаниця // Вісник Національного технічного університету "ХП". зб. наук. пр. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях.- Харків: НТУ „ХП”, 2011. – № 54. – С. 67-70.

2. Бутько, Т.В. Формування математичної моделі планування маршрутів слідування вагонів з небезпечними вантажами в умовах ризику / Т.В. Бутько, А.В. Прохорченко, С.І. Музикіна // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2012. – №3(174). – С.18-23.

3. Прохорченко, А.В. Концептуальні підходи до управління пропускнуою спроможністю залізничної інфраструктури в умовах конкуренції на ринку перевезень / А.В. Прохорченко // Залізничний транспорт України. – 2013. – Вип. 3/4. – С. 63-65.

4. Бутько, Т.В. Оцінка обчислювальної складності задачі автоматизації розрахунку графіку руху поїздів / Т.В. Бутько, А.В. Прохорченко, Г.О. Прохорченко // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2014. – Вип.3(210). – С. 18-21.

5. Бутько, Т. В. Аналіз наукових досліджень в області проблеми управління пропускнуою спроможністю залізничної інфраструктури / Т.В. Бутько, А.В. Прохорченко // Залізничний транспорт України. – 2015. – Вип. 5. – С. 18-24.

6. Бутько, Т.В. Формування логістичної технології просування вантажопотоків за жорсткими нитками графіку руху поїзді / Т.В. Бутько, Д.В. Ломотько, А.В. Прохорченко, К.О. Олійник // Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – 2009. – Вип. 111. – С. 23-30.

7. Бутько Т.В. Обґрунтування доцільності впровадження подовжених пліч оберту локомотивів та локомотивних бригад при пропуску поїздів за «жорсткими» нитками графіка / Т.В. Бутько, А.В. Прохорченко, Т.О. Костиркіна // Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – 2010. – Вип. 119. – С. 25-28.

8. Прохорченко, А.В. Удосконалення технології роботи полігону мережі на основі організації групових поїздів за жорстким графіком руху / А.В. Прохорченко, Р.О. Євреїмов // Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – 2010. – Вип. 114. – С. 192-196.

9. Прохорченко, А.В. Розроблення моделі формування плану роботи сортувальної станції на основі теорії розкладу / А.В. Прохорченко, В.М. Прохоров, А.Ю. Постоленко // Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – 2011. – Вип. 120. – С. 38-43.

10. Козак, В.В. Розробка моделі розвитку інтеперабельності міжнародних залізничних транспортних коридорів на стратегічному рівні планування перевезень / В.В. Козак, Т.В. Бутько, А.В. Прохорченко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 3. – С. 36-41.

Публікації у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

11. Прохорченко, А.В. Удосконалення технології корегування плану формування поїздів на основі погодженої організації групових поїздів оперативного призначення / А.В. Прохорченко, Л.В. Корженівський // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2008. – Т. 6. – 6(36). – С.37-40.

12. Бутько, Т.В. Розробка раціональних маршрутів прямування пасажирських поїздів на основі системи мурашиних колоній / Т.В. Бутько, А.В. Прохорченко, Є.В. Чеклова // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2009. –Т. 3. – 5(39). – С. 9-13.

13. Бутько, Т.В. Формування моделі оперативного управління процесом просування вагонів з небезпечними вантажами в підсистемі “технічна станція-прилегла дільниця” на базі нечіткої ситуаційної мережі / Т.В. Бутько,

А.В. Прохорченко, С.І. Музикіна // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – Вип.5. – С. 13-16.

14. Прохорченко, А.В. Розробка вимог до формування процесу перевезень на залізничному напрямку в розрахунку на життєвий цикл технології / А.В. Прохорченко // Зб. наук. пр. Донецького ін-ту залізнич. трансп. – 2012. – Вип. 32. – С. 25-30.

15. Прохорченко, А.В. Розробка методики визначення кількості ниток графіку руху спеціалізованих поїздів на залізничному напрямку за умови дотримання технічних і технологічних обмежень / А.В. Прохорченко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Вип. 2. – С. 46-51.

16. Прохорченко, А.В. Формування системи маршрутизації перевезень на основі концепції спеціалізації залізничної інфраструктури / А.В. Прохорченко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – Т.1. – 3(61). – С. 20-24.

17. Прохорченко, А.В. Аналіз живучості системи організації поїздопотоків на основі теорії перколяції / А.В. Прохорченко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – Т. 6. – 3(66). – С. 7-10.

18. Прохорченко, А.В. Дослідження пропускної спроможності залізничної дільниці на основі побудови параметричних функцій залежності інтенсивності від щільності поїздопотоків/ А.В. Прохорченко, О.І. Тревогін, О. Болкун // Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – 2013. – Вип. 140. – С. 44-47.

19. Прохорченко, А.В. Дослідження пропускної спроможності залізничної інфраструктури з позиції теорії транспортних потоків / А.В. Прохорченко, В.Г. Петренко // Зб. наук. пр. Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – 2014. – Вип. 145. – С. 88-95.

20. Прохорченко, А.В. Проблеми розрахунку пропускної спроможності залізничної інфраструктури в умовах ринкових відносин / А.В. Прохорченко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2014. – Вип. 4. – С. 36-41.

21. Прохорченко, А.В. Дослідження властивості масштабної інваріантності системи організації поїздопотоків на основі теорії перколяції / А.В. Прохорченко // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського нац. ун-ту залізнич. трансп. – 2014. – Вип. 5(53). – С. 56-64.

22. Прохорченко, А.В. Удосконалення методики розрахунку пропускної спроможності залізничної інфраструктури на основі обліку експлуатаційної надійності системи перевезень / А.В. Прохорченко, О.М. Волянчук // Зб. наук. пр. Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – 2014. – Вип. 146. – С. 91-95.

23. Прохорченко, А.В. Аналіз методів розрахунку пропускної спроможності залізничних дільниць / А.В. Прохорченко, В.А. Огієнко // Зб. наук. пр. Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – 2014. – Вип. 150. – С. 66-73.

24. Прохорченко, А. В. Аналіз наукових досліджень щодо проектування транспортних мереж високошвидкісного та звичайного руху / А.В. Прохорченко, Д. О. Кравченко // Зб. наук. пр. Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – 2015. – Вип. 154. – С. 70-74.

25. Бут'ко, Т. В. Формалізація технології організації групових поїздів оперативного призначення / Т.В. Бут'ко, А.В. Прохорченко, А.М. Киман // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. –Т. 4. – 3(76). – С. 38-42.

Публікації у наукових виданнях інших держав:

26. But'ko, T. Investigation into Train Flow System on Ukraine's Railways with Methods of Complex Network Analysis [Electronic resource] / T. But'ko, A. Prokhorchenko // [Science and Education Publishing From Scientific Research to Knowledge, American Journal of Industrial Engineering, 2013]. – Vol. 1(3). – P. 41-45. – Mode of access: World Wide Web: <http://pubs.sciepub.com/ajie/1/3/1/>. – Title from the screen.

Додаткові праці:

27. Пат. на корисну модель 63409 Україна, МПК В61К 9/00. Спосіб експлуатації елементів систем залізничних пасажирських перевезень / Т.В. Бут'ко, А.В. Прохорченко, О.М. Ходаківський; заявник і патентоволодар Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – № у 2011 02627; заявл. 09.03.2011; опубл. 10.10.2011, Бюл. №19. – 5 с.

28. Пат. на корисну модель 94340 Україна, МПК В61L 25/00, В61L 27/00, G06F 7/00, G06N 7/00. Автоматизована система управління парком вантажних вагонів / Т.В. Бут'ко, О.Е. Шандер, А.В. Прохорченко; заявник і патентоволодар Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – № у 2014 05755; заявл. 28.05.2014; опубл. 10.11.2014, Бюл. №21. – 5 с.

Праці апробаційного характеру:

29. Прохорченко, А.В. Формування гнучкої технології управління транспортними процесами на основі комплексу моделей з використанням колективного інтелекту: тези доп. 22-ї Міжнар. наук.-практ. конф. “Перспективные компьютерные, управляющие и телекоммуникационные системы для железнодорожного транспорта Украины” (м. Алушта, вересень 2009 р.) / А.В. Прохорченко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. – Вип. 4(дод.). – С. 4.

30. Бут'ко, Т.В. Розробка моделі розвитку і експлуатації залізничних напрямків на стратегічному рівні планування: тези доп. 7-ї міжнар. наук.-практ. конф. “Проблеми міжнародних транспортних коридорів та єдиної транспортної системи України” (смт. Коктебель, 30 травня - 4 червня 2011 р.) / Т.В. Бут'ко, А.В. Прохорченко, О.А. Горбачов // Вісник економіки транспорту і промисловості. – 2011. – Вип. 34. – С. 74-75.

31. Бут'ко, Т.В. Формування процесу перевезень на залізничному напрямку в розрахунку на життєвий цикл технології: тези доп. Scientific researches and their practical application. Modern state and ways of development'2012 (Інтернет конф. 2-12 October 2012) / Бут'ко Т.В., А.В. Прохорченко, В.С. Дюкарев // Зб. наук. пр. SWorld. – Вип. 3. – Т. 2. – С.26-28.

32. Бут'ко, Т.В. Формування системи класифікації залізничних дільниць і напрямків за видами перевезень і категоріями інфраструктури для експлуатаційної діяльності: тези доп. VIII Міжнар. наук.-практ. конф. “Проблеми міжнародних транспортних коридорів та єдиної транспортної системи України” (м. Харків, 5-8

червня 2012 р.) / Т.В. Бутько, А.В. Прохорченко // Вісник економіки транспорту і промисловості: зб. наук.-практ. ст. – 2012. – Вип. 38. – С. 68-69.

33. Прохорченко, А.В. Формування вимог до технічних регламентів та нормативного документу Повідомлення залізниць України щодо їх технічних і технологічних можливостей / А.В. Прохорченко // Семінар-нарада провідних спеціалістів Головного управління перевезень Укрзалізниці на тему “Технологічні процеси роботи станцій, дирекцій, залізниць та ТРА станцій – основоположні документи організації перевізного процесу” (м. Запоріжжя, 6-7 червня 2012 р.). – С. 86-87.

34. Бутько, Т.В. Формування раціональної топології залізничної мережі на основі концепції спеціалізації залізничної інфраструктури за її призначенням: програма и тез. докл. 36-й науч.-технической конф. преподавателей, аспирантов и сотрудников Харьковской национальной академии городского хозяйства (г. Харьков, 24-26 апреля 2012 г.) / Т.В. Бутько, А.В. Прохорченко. – Харьков: ХНАГХ, 2012. – Ч. 2. – С. 14.

35. Бутько, Т.В. Перспективи використання інтелектуальних технологій на залізничному транспорті: тези доп. III Міжнар. наук.-практ. конф. “Інноваційні технології на залізничному транспорті”, (м. Тель-Авів, 26 лютого-4 березня 2012 р.) / Т.В. Бутько, А.В. Прохорченко, С.І. Музикіна, Л.О. Пархоменко // Вісник СНУ ім. Володимира Даля. – 2012. – С.3.

36. Данько, М.І. Дослідження пропускнуої спроможності залізничних дільниць та напрямків на основі параметричних моделей залежності інтенсивності від щільності поїздопотоків: тези доп. 7-ї Міжнар. наук.-практ. конф. “Сучасні інформаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті” (м. Дніпропетровськ, 18-19 квітня 2013р.) / М.І. Данько, Т.В. Бутько, А.В. Прохорченко. – Д.: Видавництво ДНУЗТ, 2013. – С. 6.

37. Бутько, Т.В. Автоматизація розробки графіку руху поїздів на основі алгоритму штучних бджолиних колоній: тези доп. II Міжнар. наук.-техн. конф. “Обчислювальний інтелект-2013 (результати, проблеми, перспективи) Computational Intelligence, ComInt-2013” (м. Черкаси, 14-17 травня 2013 р.) / Т.В. Бутько, А.В. Прохорченко, Г.О. Прохорченко. – Ч.: Видавництво ЧДТУ. – 2013. – С.158.

38. Прохорченко, А.В. Дослідження живучості плану формування вантажних поїздів на основі теорії перколяції: тези доп. Scientific researches and their practical application. Modern state and ways of development‘2013 (Інтернет конф. 1-12 жовтня 2013 р.) / А.В. Прохорченко // Збірник наукових праць SWorld. – 2013. – Вип. 3. – Т. 2. – С. 97-99.

39. Прохорченко, А.В. Дослідження системи організації вагонопотоків у поїзди на основі методів аналізу складних мереж: тези доп. 75-ї Міжнар. наук.-практ. конф. “Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті” (м. Харків, 24-25 квітня 2013) / А.В. Прохорченко, О.А. Горбачов // Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Вип. 136. – С. 373-374.

40. Прохорченко, А.В. Дослідження пропускнуої спроможності залізничної інфраструктури на основі врахування експлуатаційної надійності системи перевезень: тези доп. 76 Міжнар. наук.-практ. конф. “Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті” (м. Харків, 15-17 квітня 2014 р.) /

А.В. Прохорченко // Зб. наук. пр. Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – 2014. – Вип. 143. – С. 287.

41. Прохорченко, А. В. Дослідження властивості масштабної інваріантності системи організації поїздопотоків на залізницях України: тези доп. 27-ї Міжнар. наук.-практ. конф. “Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті” (м. Харків, 24-26 вересня 2014 р.) / А. В. Прохорченко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2014. – Вип. 4(дод.). – С. 15.

42. Прохорченко, А.В. Дослідження властивостей системи просторової організації вагонопотоків в поїзди на залізничній мережі на основі теорії перколяції: тези доп. 77-ї Міжнар. наук.-практ. конф. “Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті” (м. Харків, 15-17 квітня 2015 р.) / А. В. Прохорченко // Зб. наук. пр. Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – 2015. – Вип. 151. – С. 121-122.

АНОТАЦІЯ

Прохорченко А.В. Формування методів управління розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури в умовах недискримінаційного доступу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.01 – транспортні системи. – Український державний університет залізничного транспорту МОН України, Харків, 2016.

Дисертація присвячена питанням підвищення ефективності функціонування залізничного транспорту України в умовах недискримінаційного доступу до залізничної інфраструктури на основі розробки методів управління розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури, які передбачають відмову від централізованого управління та впровадження принципу управління, що стає внутрішньою функцією системи на основі появи самоорганізації.

З цією метою в роботі розроблено метод класифікації залізничних дільниць і напрямків для експлуатаційної діяльності, сформовано метод оцінки практичної пропускної спроможності залізничних дільниць та розроблено математичну модель розподілу пропускної спроможності залізничної мережі, що дозволяє пристосувати режими експлуатації інфраструктури залізничної мережі до вимог користувачів. В межах досліджень підтверджена гіпотеза про належність мережі призначень плану формування поїздів залізниць України до класу безмасштабних мереж та обґрунтовано вплив статистичних макровластивостей структури маршрутизації поїздопотоків на ефективність розподілу пропускної спроможності залізничної інфраструктури. Для практичної реалізації розроблених методів і моделей в роботі розроблено вимоги щодо реалізації автоматизованої системи управління розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури України, яка дозволить інтегрувати всі етапи управління в межах єдиного інформаційного середовища та надасть учасникам ринку перевезень більшу інформативність та вищий рівень взаємодії.

Ключові слова: управління, розподіл пропускної спроможності, залізнична інфраструктура, експлуатаційна надійність, графік руху поїздів, маршрутизація, поїздопотік.

АННОТАЦИЯ

Прохорченко А.В. Формирование методов управления распределением пропускной способности железнодорожной инфраструктуры в условиях недискриминационного доступа. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.01 – транспортные системы. – Украинский государственный университет железнодорожного транспорта МОН Украины, Харьков, 2016.

Диссертация посвящена вопросам повышения эффективности функционирования железнодорожного транспорта Украины в условиях недискриминационного доступа к железнодорожной инфраструктуре на основе разработки методов управления распределением пропускной способности железнодорожной инфраструктуры, предусматривающих отказ от централизованного управления и внедрения принципа управления, который становится внутренней функцией системы на основе появления самоорганизации.

В работе проведен анализ тенденций развития рынка грузовых перевозок на железных дорогах мира и существующего состояния железнодорожного транспорта Украины. Выполненный анализ функционирования железных дорог Украины в действующих условиях организации перевозок показал значительный износ основных фондов, а технологии перевозок не позволяют обеспечить точность доставки грузов. На основе проведенного анализа функционирования железных дорог общего пользования с разделенными функциями управления инфраструктурой и эксплуатацией обоснована необходимость решения научно-прикладной проблемы управления пропускной способностью железнодорожной инфраструктуры в условиях реформирования железнодорожного транспорта Украины, что позволит улучшить логистику перевозок.

Для решения данной научно-прикладной проблемы в диссертации сформированы методы управления распределением пропускной способности железнодорожной сети. Разработан метод классификации железнодорожных участков и направлений для эксплуатационной деятельности, который позволяет разделить участки по транспортно-эксплуатационным качествам и потребительским свойствам и предназначен для формирования системы оценок технических и технологических возможностей железнодорожной инфраструктуры. Сформирован метод расчета практической пропускной способности железнодорожной инфраструктуры, который позволяет повысить точность определения максимального количества поездов на участке в соответствии с установленным режимом его эксплуатации согласно предложенной классификации. Формализован процесс функционирования железнодорожной сети в условиях существования различных вариантов режимов движения и доступа к железнодорожным участкам на основе математической модели распределения пропускной способности железнодорожной сети с учетом принципов самоорганизации. Разработан подход к решению данной математической модели на основе мультидисциплинарной оптимизации, где на глобальном уровне оптимизации использован генетический алгоритм, что позволяет определять различные варианты режимов движения на участках сети и доступа к ним по критерию минимизации затрат на эксплуатацию

сети и достижения рационального распределения пропускной способности сети, тогда как с помощью алгоритма муравьиных колоний выполняется маршрутизация поездопотоков в пределах установленной пропускной способности и определенных стоимостей доступа по локальным критериям, которые устанавливаются перевозчиками.

В рамках исследований подтверждена гипотеза о принадлежности сети назначений ПФП железных дорог Украины к классу безмасштабных сетей и теоретически обосновано влияние статистических макросвойств структуры маршрутизации поездопотоков на эффективность распределения пропускной способности железнодорожной сети. Для практической реализации разработанных методов в работе представлены требования к формированию автоматизированной системы управления распределением пропускной способности железнодорожной инфраструктуры Украины, которая позволит интегрировать все этапы управления в рамках единого информационного пространства и предоставит участникам рынка перевозок большую информативность и высокий уровень взаимодействия.

Ключевые слова: управление, распределение пропускной способности, железнодорожная инфраструктура, эксплуатационная надежность, график движения поездов, маршрутизация, поездопоток.

ABSTRACT

Prokhorchenko A. Formation methods of management of the allocation of railway infrastructure capacity in a non-discriminatory access. – Manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences on speciality 05.22.01 – transport systems. – Ukrainian State University of Railway Transport MES of Ukraine, Kharkiv, 2016.

The thesis is devoted to improving the efficiency of rail transport in Ukraine under non-discriminatory access to rail infrastructure through the development of methods of management of allocation of railway infrastructure capacity, providing for the rejection of centralized management and implementation of the principle of governance, which becomes an internal function of the system based on the emergence of self-organization.

To this end, the method of classification of railway lines and transport corridors for operational activities has been developed, a more accurate method of assessing the real capacity of railway lines and mathematical model of the allocation of railway network capacity, allowing you to adjust the operating modes of rail network infrastructure to the requirements of users, had been formed. Within the research, the hypothesis of affiliation of network destinations of Train Formation Plan of Ukrainian railways to the class of scale-free networks has been confirmed, and the influence of statistical macro-property of train flows routing structure on the efficiency of railway infrastructure capacity had been grounded. For practical implementation of methods and models developed, in this work, the requirements for the implementation of the automated management system of allocation of infrastructure capacity of Ukrainian railway, which will integrate all phases of management within a single information environment and give to the transport market participants more informational content and has been developed.

Keywords: management, allocation capacity, rail infrastructure, service reliability, train timetable, routing, train flows.

ПРОХОРЧЕНКО АНДРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 656.22

**ФОРМУВАННЯ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ РОЗПОДІЛОМ ПРОПУСКНОЇ
СПРОМОЖНОСТІ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ В УМОВАХ
НЕДИСКРИМІНАЦІЙНОГО ДОСТУПУ**

05.22.01 – транспортні системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Відповідальний за випуск

доц. Головка Т.В.

Підписано до друку ”__” _____ 2016 р.
Формат паперу 60×84 1/16. Папір для множних апаратів.
Умовн. – рук. арк. 1,8. Обл.-вид. арк. 1,9
Замовлення №____. Тираж 150 прим.

Видавництво УкрДУЗТ. Свідоцтво ДК № 2874 від 12.06.2007 р.
Друкарня УкрДУЗТ: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7