

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет залізничного транспорту

ПРОХОРЧЕНКО ГАЛИНА ОЛЕГІВНА



УДК 656.222.4:681.5

**ФОРМУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ СКЛАДАННЯ
НОРМАТИВНОГО ГРАФІКА РУХУ ПОЇЗДІВ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ
НАПРЯМКУ**

05.22.01 – транспортні системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис

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

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

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Шраменко Наталя Юріївна,
Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, кафедра транспортних технологій і логістики, професор кафедри;

кандидат технічних наук, доцент
Кириченко Ганна Іванівна,
Державний університет інфраструктури та технологій, кафедра управління процесами перевезень, завідувач кафедри.

Захист відбудеться “ 29 ” червня 2018 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.04 в Українському державному університеті залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейербаха, 7.

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

Автореферат розісланий “ 26 ” травня 2018 р.

В.о. ученого секретаря
спеціалізованої вченої ради



О.М. Огар

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасні вимоги ринку перевезень потребують підвищення точності доставки вантажів і пасажирів на великі відстані, що в умовах існуючої системи експлуатаційної роботи залізниць України вимагає покращення якості та гнучкості в плануванні перевезень. Це можна досягти за рахунок надання більшого значення плануванню перевезень у часі та просторі в межах залізничних напрямків, що дозволить утворити рентабельну операційну модель руху поїздопотоків за розкладом.

Особливої актуальності впровадження системи перевезень за розкладом набуває в умовах реалізації Державної цільової програми реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки та виконання розпорядження Кабінету Міністрів України від 26.11.2014 р. № 1148р “Про схвалення розроблених Міністерством інфраструктури планів імплементації деяких актів законодавства ЄС з питань залізничного транспорту”, що передбачають дерегуляцію залізничної галузі. Повинна отримати розвиток модель організації перевезень, яка враховує наявність компаній-перевізників різної форми власності, що виконують роботу з організації перевезень вантажів і пасажирів, і залізничного підприємства, яке володіє залізничною інфраструктурою та отримує основний прибуток за рахунок продажу ниток графіка руху поїздів (ГРП). За таких умов постає необхідність виконання контрактних умов між перевізниками та власником інфраструктури в частині точності переміщення поїздопотоків, особливо на великі відстані, раціонального використання рухомого складу та пропускної спроможності залізничних ліній, що може становити складність, оскільки вимагає узгодження маршрутів прямування поїздів у нормативному ГРП між значною кількістю дільниць на залізничній мережі.

Існуюча на залізничній мережі України система складання нормативного ГРП базується на дільничному методі ув'язки наскрізних ниток поїздів на мережевому рівні та унеможлиблює процес оперативного реагування на зміну діючих або введення нових маршрутів наскрізних поїздів. Відсутньою є інтегрована ув'язка ниток графіка на мережевому рівні з урахуванням щодобової інтенсивності поїздопотоків. Для виключення вище зазначених недоліків необхідно сформувати автоматизовану технологію складання нормативного графіка руху поїздів на залізничних напрямках з подальшою інтеграцією до інформаційно-керуючої системи на основі формування системи підтримки прийняття рішень (СППР) для автоматизованого складання та аналізу графіка руху поїздів.

Зважаючи на викладене вище, тема дисертаційної роботи є актуальною і орієнтована на вирішення важливого завдання удосконалення системи складання нормативного графіка руху поїздів на залізничних напрямках.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась відповідно до Транспортної стратегії України на період до 2020 року (розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 р. № 2174-р), Державної цільової програми реформування залізничного транспорту на 2010–2019 роки (постанова Кабінету Міністрів України від 16.12.2009 р. № 1390 зі змінами на доповненнями), а також науково-дослідних робіт за темами, у яких

автор брав безпосередню участь як виконавець: “Формування комплексу універсальних моделей, реалізація яких забезпечує раціональну організацію вантажопотоків на залізничній транспортній мережі” (ДР №0111U002236); “Проведення дослідного автоматизованого розрахунку нормативного графіка руху поїздів на залізничному напрямку” (ДР №0114U003614); “Методи формування інтелектуальних залізничних транспортних систем” (ДР №0113U001032), “Удосконалення процедури побудови графіка руху поїздів на основі автоматизації” (ДР №0115U006513).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності перевезень на залізничному транспорті України на основі автоматизації процедури складання нормативного графіка руху поїздів на залізничному напрямку. Це дозволить підвищити точність діючої операційної моделі перевезень, а в майбутньому прискорити процес обробки запитів компаній-перевізників на наскрізні нитки графіка за рахунок знаходження раціонального розкладу руху поїздів на залізничному напрямку з урахуванням аналізу взаємопов’язаних наслідків виникнення затримок і технічних і технологічних обмежень залізничної інфраструктури.

Реалізація цієї мети потребує постановки та вирішення таких задач дослідження:

- провести аналіз умов функціонування залізничного транспорту України при діючій системі виконання графіка руху поїздів;
- провести аналіз існуючої процедури складання графіка руху поїздів для залізничної мережі ПАТ «Укрзалізниця»;
- провести аналіз теоретичних і практичних досліджень щодо автоматизації розрахунку графіка руху поїздів;
- формалізувати процедуру побудови графіка руху поїздів при проведенні автоматизованих розрахунків з урахуванням різних запитів на прямування наскрізних поїздопотоків;
- розробити метод моделювання розповсюдження затримки у графіка руху поїздів на залізничному напрямку;
- розробити процедуру автоматизованого складання нормативного графіку руху поїздів на залізничному напрямку;
- сформулювати вимоги до автоматизованої системи складання графіка руху поїздів;
- провести економічне обґрунтування від встановлення раціональної межі завантаження залізничного напрямку на основі автоматизації побудови графіка руху поїздів.

Об’єкт дослідження – процес планування руху поїздопотоків на залізничному напрямку.

Предмет дослідження – автоматизована технологія складання нормативного графіка руху поїздів на залізничному напрямку.

Методи дослідження. Виконані дослідження функціонування залізничного транспорту України при діючій системі виконання графіку руху поїздів базуються на процедурі аналізу ринку залізничних перевезень і математичної статистики. Для пошуку ефективного методу розв’язання задачі розрахунку ГРП використано метод

звуження, що дозволив довести NP-повноту даної задачі. Для побудови оптимізаційної моделі розрахунку ГРП використано методи математичного аналізу, теорії множин, теорії розкладів, методи дослідження операцій, зокрема нелінійне програмування. Для моделювання розповсюдження затримок у ГРП використано метод імітаційного моделювання, методи візуалізації даних, регресійний аналіз. Для розв'язання математичної моделі розрахунку нормативного графіку руху поїздів використано адаптований алгоритм штучних бджолиних колоній. Використано методи дослідження інформаційних потоків при формуванні інформаційно-керуючої системи з реалізацією СППР для складання та аналізу графіка руху поїздів.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі вирішено наукове завдання удосконалення процедури складання нормативного графіка руху поїздів для залізничного напрямку шляхом автоматизації розрахунків з побудови та аналізу розкладів руху пасажирських і вантажних поїздів з урахуванням інтересів незалежних перевізників. Це дозволить прокласти наскрізні нитки графіка для забезпечення узгодженого руху наскрізних поїздів на напрямку з одночасною оптимізацією параметрів руху поїздів інших категорій.

Вперше:

- для формування автоматизованої технології складання нормативного графіка руху поїздів розроблено оптимізаційну математичну модель із застосуванням мультиагентної оптимізації на основі мінімізації сумарних витрат простою всіх поїздів, витрат на зупинку поїздів, рівня штрафу за невиконання директивних строків прибуття поїздів на станцію призначення та витрат на можливі затримки в реальних умовах руху, яка дозволяє з урахуванням різних запитів отримати раціональний розклад руху на кожній із дільниць залізничного напрямку для забезпечення узгодженого руху поїздопотоків з відповідною системою обмежень, що враховує технічні і технологічні параметри інфраструктури;

- для оцінювання надійності сформованого за допомогою автоматизованих розрахунків графіка руху поїздів розроблено метод моделювання розповсюдження затримок поїздів на залізничному напрямку, що дозволяє отримати залежності еволюції динаміки розповсюдження затримок поїздів у часі та просторі.

Удосконалено:

- комплекс функціональних задач системи АСК ВП УЗ-Є на основі формування автоматизованої системи розрахунку та аналізу графіка руху поїздів на залізничному напрямку для зведення до мінімуму експертного підходу до складання графіку руху, що підвищить якість та швидкість його складання, та в подальшому надасть можливість проводити гнучкі розрахунки щодо надання ниток графіку руху поїздів перевізникам різної форми власності. Це набуває важливого значення в умовах впровадження відкритого доступу до залізничної інфраструктури.

Практичне значення одержаних результатів. Практичні результати роботи полягають у тому, що вирішено прикладне завдання автоматизованої побудови ГРП на залізничному напрямку, яке дозволяє підвищити ефективність, зокрема точність перевезень, врахувати бажані строки доставки вантажів на станцію призначення при мінімізації непродуктивних простоїв та обліку умов реальних

умов руху і, як наслідок, надійність просування поїздопотоків. Розроблений комплекс математичних моделей дозволяє побудувати в автоматизованому режимі нормативний ГРП на окремих дільницях, сформований метод стикування суміжних дільниць надає можливість прокладання наскрізних ниток поїздів на напрямку.

За допомогою розробленого методу розповсюдження затримок поїздів можна перевірити на стійкість нормативний графік руху поїздів до можливих затримок, підвищити його точність і надійність. Це в подальшому дозволить оцінити можливі ризики при виділенні наскрізних ниток ГРП для компаній-перевізників. Розроблено вимоги до створення автоматизованої системи складання та аналізу ГРП на основі запропонованого комплексу математичних моделей і методів для підвищення рівня планування перевезень і зменшення експертного впливу на процес складання ГРП. Очікується, що загальна сума економічного ефекту з наростаючим підсумком за п'ять років в умовах зміни інтенсивності поїздопотоків на основі автоматизованої технології складання ГРП та впровадження варіанта з раціональним використанням пропускної спроможності залізничного напрямку становитиме близько 376 млн грн.

Результати дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі кафедри управління експлуатаційною роботою, а також Інституту перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ) при підготовці фахівців з організації перевезень на залізничному транспорті. Результати дослідження використані при удосконаленні експлуатаційної роботи регіональної філії "Придніпровська залізниця" ПАТ "Укрзалізниця", що підтверджується відповідними актами впровадження, які наведені в додатках до дисертаційної роботи.

Особистий внесок здобувача. У наукових працях, опублікованих зі співавторами, особистий внесок полягає у такому: у [1,7] формалізовано задачу побудови ГРП у вигляді задачі flow-shop; у [2,10,11] за методом звуження доведено належність задачі розрахунку ГРП до однієї з NP-повних задач – задачі розбиття; у [3,8] здійснено модифікацію алгоритму штучних бджолиних колоній для розв'язання задачі автоматизації розрахунку ГРП; у [4] розроблено процедуру стикування ниток графіка руху суміжних дільниць на залізничному напрямку; у [5] проведено дослідження впливу первинної затримки на надійність ГРП; у [6,16,17] розроблено метод розповсюдження затримки в нормативному ГРП та проведено моделювання; у [9,12,13,15] розроблено вимоги до автоматизованої системи розробки та аналізу графіку руху поїздів. Дослідження, що висвітлені в усіх наукових працях, проводилися в УкрДУЗТ.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідалися, обговорювалися та ухвалені на таких конференціях: II Міжнародній науково - технічній конференції "Обчислювальний інтелект - 2013 (результати, проблеми, перспективи) Computational Intelligence, ComInt – 2013" (м. Черкаси, 14 - 18 травня 2013 р.); Scientific researches and their practical application. modern state and ways of development (м. Одеса, 01-12 жовтня 2013 р.); LXXV та LXXVI Міжнародних науково-технічних конференціях "Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті" (м. Харків, 24-25 квітня 2013 р. та 15-17 квітня 2014 р.);

27 Міжнародній науково-практичній конференції “Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті”(м. Харків, 24-26 вересня 2014 р.); XV Міжнародній науково-технічній конференції “Инженерия поверхности и реновация изделий” (с. Затока Одеської обл., 01-05 червня 2015 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції “Сучасні проблеми правового, економічного та соціального розвитку держави”(м. Харків, 20 листопада 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції “Інновації інфраструктури транспортно-логістичних систем. Проблеми, досвід, перспективи” (м. Сєверодонецьк, 11-17 квітня 2016 р.); LXXVII Міжнародній науково-технічній конференції “Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті” (м. Харків, 21-23 квітня 2015 р.); Міжнародній науковій конференції “Globalization of scientific and educational space. Innovations of transport. Problems, experience, prospects” (3-12 May 2017, Dresden (Germany) - Paris (France); LXXIX Міжнародній науково-технічній конференції “Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті” (м. Харків, 25-27 квітня 2017 р.).

У повному обсязі дисертаційна робота доповідалася на розширеному засіданні кафедри управління експлуатаційною роботою УкрДУЗТ.

Публікації. Відповідно до теми дисертації опубліковано 17 наукових праць, з яких 6 статей, що опубліковані у фахових наукових виданнях, затверджених МОН України (три статті включені до міжнародних наукометричних баз, одна з них включена до бази Scopus), одинадцять праць апробаційного характеру.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотацій, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

Повний обсяг дисертації складає 185 сторінок, з яких обсяг основного тексту – 111 сторінок, 48 рисунків за текстом, та 1 таблиця і 2 рисунки на окремих сторінках, список використаних джерел із 142 найменувань, і 5 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі дослідження, відображено наукову новизну та практичну цінність, подано загальну характеристику роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз основних кількісних і якісних показників роботи залізничного транспорту. На фоні зменшення обсягів перевезень залізничним транспортом за 2014-2017 рр. визначено тенденцію до поступового погіршення якісних експлуатаційних показників, зокрема обігу вантажного вагона, який станом на 2017 р. становить більше 9 діб, що в 1,5 рази більше, ніж у 2011 р. Виявлено, що при зменшенні кількісного показника поїздо-кілометрів спостерігається збільшення дільничної швидкості поїздів, що суперечить транспортним закономірностям і свідчить про те, що основною причиною погіршення якісних показників є зниження ефективності існуючої технології організації перевезень. Виявлено тенденцію щодо зростання дальності перевезень починаючи з 2011 р. і важливість взаємопов'язаного руху поїздопотоків через основні залізничні напрямки, що з'єднують основні промислові райони країни з сухопутними та морськими міжнародними коридорами. Проведено аналіз надійності виконання ГРП на ПАТ “Укрзалізниця”. У якості одного з чинників

надійності виконання ГРП в діючих умовах функціонування ПАТ “Укрзалізниця” запропоновано розглянути кількість і час затримок поїздів біля вхідних сигналів станцій. За результатами аналізу можна зробити висновок про значний вплив цих чинників на експлуатаційну роботу залізничної мережі в цілому. Проведено аналіз збитків від затримок поїздів біля вхідних сигналів станцій ПАТ “Укрзалізниця”, яка зазнала збитків за 2016 р. майже 1 млн грн. Виявлено, що одна з причин даної ситуації – неналежна якість складання нормативного ГРП, що в умовах відкритого доступу до інфраструктури та виконання контрактів на перевезення є неприйнятним. Був проведений аналіз існуючих методів автоматизованої побудови ГРП та існуючої процедури складання ГРП у ПАТ “Укрзалізниця”, який довів наявність недоліків в існуючій процедурі, зокрема напівавтоматизований розрахунок розкладів руху вантажних поїздів і ручний спосіб побудови за дільничним методом. На основі вищезазначеного зроблено висновки щодо усунення виявлених недоліків за допомогою впровадження автоматизації технології складання ГРП.

Дослідженням у сфері завдань з розроблення графіка руху поїздів і його автоматизованого складання, що відноситься до задач розрахунку розкладу поїздів (англ., Train Timetabling Problem, ТТР), приділялося багато уваги вченими різних країн світу, серед яких можна виділити А. Caprara, В. Szpigel, R. Sauder, D. Jovanovic, Р. Т. Harker, М. Pena-Alcaraz, Х. Zhou, А. Higgins, Е. Kozan, L. Ferreira, Е. Oliveira, В.М. Smith та ін.

Вітчизняними вченими та практиками також приділялося багато уваги застосуванню інформаційних технологій в експлуатаційній роботі, дослідженням якісного складання графіка руху поїздів і удосконаленню застосування різних підходів для його побудови та оптимізації, серед яких особливо можна відзначити праці Є.В. Ададурової, В.М. Акулінічева, Т.В. Бутько, І.І. Васильєва, Н.А. Воробйова, Б. Дел Ріо, Г.І. Державця, І.В. Жуковицького, Б.О. Зав'ялова, С.С. Зяброва, Д.В. Ломотька, А.П. Петрова, В.В. Повороженко, Д.Ю. Левіна, Д.М. Козаченка, В.К. Козлова, Ф.П. Кочнева, Г.І. Кириченко, Н.А. Самаріної, В.В. Скалозуба, Є.М. Тишкіна, Н.Ю. Шраменко, Ю.С. Хандакарова та ін. Дослідження були спрямовані на використання нових методів моделювання з застосуванням комп'ютерних пристроїв, однак вони не отримали практичного значення на залізничному транспорті України. Вирішенню завдання дослідження розповсюдження затримки в ГРП на залізничній мережі України та її подібних мережах на просторі країн СНД взагалі приділено досить мало уваги, проведені дослідження В.О. Баланова, М.Л. Жаркова не дозволяють дослідити різні варіанти виникнення затримок і деталізовану динаміку утворення каскадів затримок. Однак на залізницях світу, де ГРП є ключовим механізмом реалізації перевізного процесу, набула розвитку теоретична база вивчення розповсюдження затримки. Вирішенням даного завдання займалися такі вчені, як Т. Büker, В. Seybold, М. Goerigk, А. Schöbel, N. Kliewer, L. Suhl, W. Schwanhäusser.

Проведеним аналізом виявлено, що не повністю було сформовано наукові підходи до автоматизації процесу складання нормативного графіка руху поїздів для залізничної мережі змішаного руху, зокрема України та її подібних. На підставі наведеного вище стає актуальним вирішення наукового завдання щодо формування

автоматизованої технології складання нормативного ГРП на напрямку, яка дозволить зменшити вплив експертної складової при його формуванні, задовольнити вимоги перевізників щодо точності та швидкості руху поїздопотоків на далекі відстані.

У другому розділі проведено оцінювання обчислювальної складності задачі автоматизованого складання ГРП. Доведено, що задача розрахунку ГРП за методом звуження може бути зведена до задачі розбиття і є NP-повною відносно кількості конфліктів у розкладі. Спираючись на складність задачі, розроблено оптимізаційну математичну модель розрахунку ГРП на дільниці з застосуванням мультиагентного методу оптимізації, що дозволяє знаходити ГРП, близький до оптимального, протягом прийняттого часового інтервалу.

Запропоновано представити процес прокладання ниток ГРП на дільниці як задачу оптимального розподілу обмежених ресурсів у часі, що в термінах теорії розкладів може бути формалізовано відповідно до задачі flow-shop (потоктова лінія). Позначимо через множину $N = \{1, 2, 3, \dots, i, \dots, n\}$ кількість ниток графіка руху поїздів, що відповідають кількості заявок операторів перевезень, і через множину $M = \{1, 2, \dots, j, \dots, m\}$ кількість перегонів на дільниці. Час руху поїздів по дільниці можна записати у вигляді матриці $T = \|t_{ij}\|$, елементи якої t_{ij} відповідають часу прямування i -го поїзда через j -й перегін. Якщо позначити g_{ij} як момент закінчення зайняття поїздом i перегону j (або час прибуття поїзда на станцію $k + 1$ з перегону j , де k – порядковий номер станції), то матриця $G = \{g_{ij}\}$ по суті являє собою розклад руху поїздів. Діаграму Ганта, що описує розклад руху поїздів, наведено на рисунку 1.

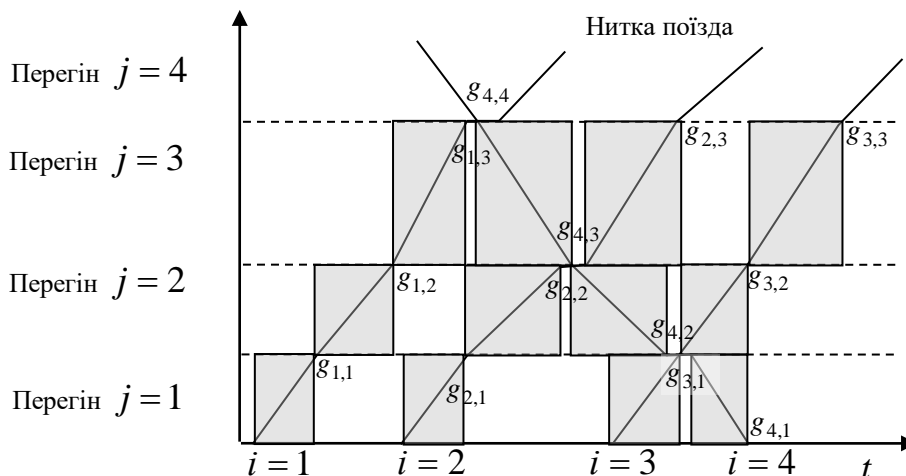


Рисунок 1 – Графічне подання діаграми Ганта, що описує розклад руху поїздів

У якості критерію оцінювання варіантів ГРП прийнято мінімум сумарних витрат на вартість простоїв усіх поїздів на дільниці, витрат на зупинку поїзда, рівня штрафу за невиконання директивних строків прибуття поїздів на станцію призначення та витрат на можливі затримки в реальних умовах руху. За таких умов оптимізаційна математична модель розрахунку графіка руху поїздів буде мати такий вигляд:

$$\begin{aligned}
F(g_{ij}) = & \sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^n \left[c_{\text{поїзд-зод}} (g_{i,j+1} - t_{i,j+1} - g_{ij}) + \delta_{ij} c_{ij}^{\text{зуп}} \right] \right] + \\
& + \sum_{i=1}^n c_i^{\text{штраф}} \max(0, (g_{ij=L} - D_{iL})) + \\
& + \sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^n \left[c_{ij}^{\text{зуп,зод}} \cdot f_{ij}(g_{ij}, t_{ij}^{\text{зуп}}) \right] \right] \rightarrow \min,
\end{aligned} \tag{1}$$

при обмеженнях

$$g_{ij} > 0; g_{ij} \leq T, i \in N, j \in M; \tag{2}$$

$$g_{i,j+1} = g_{ij} + t_{ij} + t_{ij}^{\text{зуп}} \cdot \delta_{ij} + t_{ij}^{\text{розг}} \cdot \gamma_{ij}; \tag{3}$$

$$g_{ij} - I_j \leq g_{i+1j} - t_{ij}; \tag{4}$$

$$\zeta \left[g_{ij} + \tau_{cxj} \leq g_{i+1j} - t_{ij} \right]; \tag{5}$$

$$\zeta \left[g_{ij} + \tau_{mj} \leq g_{i+1j} - t_{ij} \right]; \tag{6}$$

$$\zeta \left[\sum_i^n x_{ijt} \leq 1 \right], \tag{7}$$

де $x_{ijt} = 1$ для $g_{ij} - t_{ij} \leq t < g_{ij}$
та 0 в іншому випадку, $t \in T, i \in N$;

$$\eta \left[\sum_i^n x_{ijt} \geq 0 \right], i \in N; \tag{8}$$

$$\sum_j^m x_{ijt} = 1, j \in M; \tag{9}$$

$$N_j^{\text{номп}} \leq \sum_i^n x_{ijt} \leq N_j^{\text{наявн}}, \tag{10}$$

$$\sum_i^n x_{ijt} \leq M_{j \in \{\text{парні/непар}\}}^{\text{station}}, \tag{11}$$

$$t_{ij}^{\text{зуп}} \leq t_{i \in \{\text{вант/нас}\}}^{\text{ном}}, \tag{12}$$

$$g_{ij=1} < g_{ij+1} \dots < g_{ij=m}, \tag{13}$$

тут $g_{ij} < g_{ij+1}$ визначає, що операція
прибуття g_{ij} може початися не раніше,
ніж відбудеться операція g_{ij+1}
< – відношення повного (лінійного)
строгого порядку, для будь-якої пари g_{ij}, g_{ij+1}

де i – номер нитки прямування поїзда, $i=1, 2, \dots, n$; j – номер перегону на дільниці, $j=1, 2, \dots, m$; $c_{\text{поїзд-зод}}$ – вартість простою поїзда на роздільному пункті, грн; g_{ij} – момент закінчення заняття поїздом i перегону j , хв; g_{ij+1} – момент закінчення зайняття поїздом i перегону $j+1$, хв; $t_{i,j}$ – нормативний час прямування i -го поїзда через перегін j , хв; δ_{ij} – функція Хевісайда, де $\delta_{ij}=1$, якщо i -й поїзд має зупинку на j -му перегоні ($t_{ij}^{\text{нром}} > 0$); $\delta_{ij}=0$ якщо зупинки немає; $c_{ij}^{\text{зуп}}$ – витрати, пов'язані з погашенням та відновленням енергії i -го поїзду при зупинці на j -му перегоні, що залежать від профілю перегону, грн; $c_{ij}^{\text{штраф}}$ – вартість штрафу за несвоєчасне прибуття i -го поїзда на станцію призначення, грн; L – перегін, що передує станції призначення поїзда, $L=1, 2, \dots, m$; D_{iL} – директивний строк прибуття i -го поїзда з перегону L на станцію призначення, хв; $t_{i,j+1} \leq T$ – період планування, $T = 1440$ хв; $t_{ij}^{\text{зуп}}, t_{ij}^{\text{розг}}$ – відповідно нормативний час на розгін та уповільнення i -го поїзда на j -му перегоні, хв; γ_{ij} – функція, де $\gamma_{ij} = 1$, якщо i -й поїзд має розгін на j -му перегоні ($t_{ij}^{\text{нром}} > 0$), та $\gamma_{ij} = 0$ у випадку, якщо поїзд проходить станцію без зупинки; I_j – міжпоїзний інтервал на j -му перегоні, хв; ζ – ідентифікатор перегону, що набуває значення $\zeta = 1$, якщо перегін одноколіїний, $\zeta = 0$ у випадку двоколіїного перегону, $\zeta \in \{1;0\}$; η – ідентифікатор перегону, що набуває значення $\eta = 1$, якщо перегін двоколіїний, $\eta = 0$ в іншому випадку, $\eta \in \{1;0\}$; τ_{cxj} – станційний інтервал

схрещення, xv ; τ_{nj} – станційний інтервал неодночасного прибуття на j -му перегоні, xv ; x_{ijt} – функція, що набуває значення $x_{ijt} = 1$, якщо в момент часу t перегін j зайнятий поїздом i , $x_{ijt} = 0$ в іншому випадку, $i \in N, j \in M, t = 1, 2, \dots, T$.

Наведена вище оптимізаційна математична модель містить систему обмежень, що враховує логічні обмеження при прокладанні ниток поїздів через перегони, дотримання міжпоїзних і станційних інтервалів, раціональне використання пропускної спроможності дільниці, наявність необхідної кількості колій на роздільних пунктах та інші технічні й технологічні обмеження при проходженні поїздів через дільницю.

Для розв'язання задачі розрахунку оптимального ГРП в дисертаційній роботі запропоновано застосувати один з методів мультиагентної оптимізації – алгоритм штучних бджолиних колоній (англ., Artificial Bee colony Algorithm, ABC). Ефективність алгоритму штучних бджолиних колоній обумовлена тим, що, на відміну від класичних методів, які є високоітеративними та висувають певні вимоги до цільової функції, він характеризується більшою швидкістю знаходження розв'язку, не схильний до зациклення на локальних екстремумах і не висуває вимог до залежностей, які досліджуються. Адаптуючи принципи живої природи до поставленої задачі автоматизованого розрахунку ГРП, запропоновано представити процес пошуку найкращого джерела нектару колонією бджіл як процедуру побудови оптимального ГРП. Під кількістю знайденого нектару слід розуміти значення цільової функції, що оцінює ефективність побудови нитки ГРП. Тоді як процес пошуку їжі робочою бджолою можна розглядати як пошук точок прибуття i -го поїзда на кожен перегін дільниці для прокладання початкового варіанта прямуювання поїзда дільницею, а роботу бджіл-дослідників – як пошук кращих варіантів прокладання даної нитки, побудованої на попередньому етапі, у визначених межах – локальних областях (рис. 2).

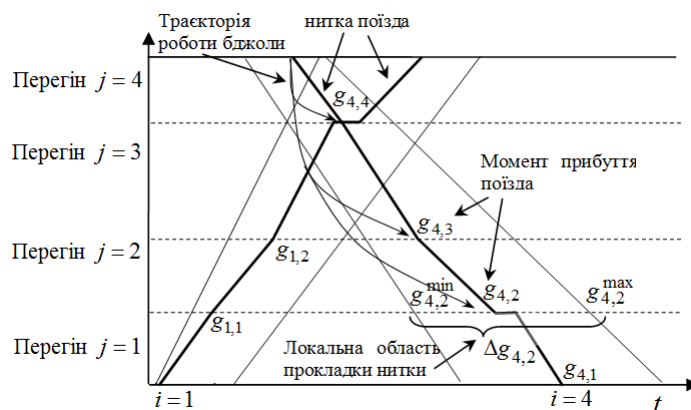


Рисунок 2 – Графічне подання побудови ниток графіка руху поїздів з використанням методу ABC

Побудова ГРП в межах ABC являє собою ітераційний процес, під час якого будується розклад, після чого проводиться імітаційне моделювання розповсюдження випадкових затримок у даному розкладі для визначення сумарних витрат на затримки всіх поїздів. За таким підходом відбувається пошук найбільш

прийняттого варіанта нормативного ГРП з урахуванням надійності прямування поїздопотоків через дільницю.

У третьому розділі розроблено метод дослідження розповсюдження затримок поїздів у ГРП та запропоновано процедуру автоматизованого складання ГРП на залізничному напрямку. Для оцінювання останньої складової в наведеному вище критерії математичної моделі розрахунку ГРП – функції, що дозволяє визначити сумарну затримку всіх поїздів у графіку залежно від випадкової затримки, яка виникає в реальних умовах руху, було розроблено метод моделювання розповсюдження затримок у ГРП на напрямку. Для реалізації механізму виникнення та поширення затримок поїздів на залізничній мережі важливим є визначення основних складових у фактичному часі руху поїздів на дільницях (рис. 3. а). Схема виникнення можливих конфліктів наведена на рисунку 3.б.

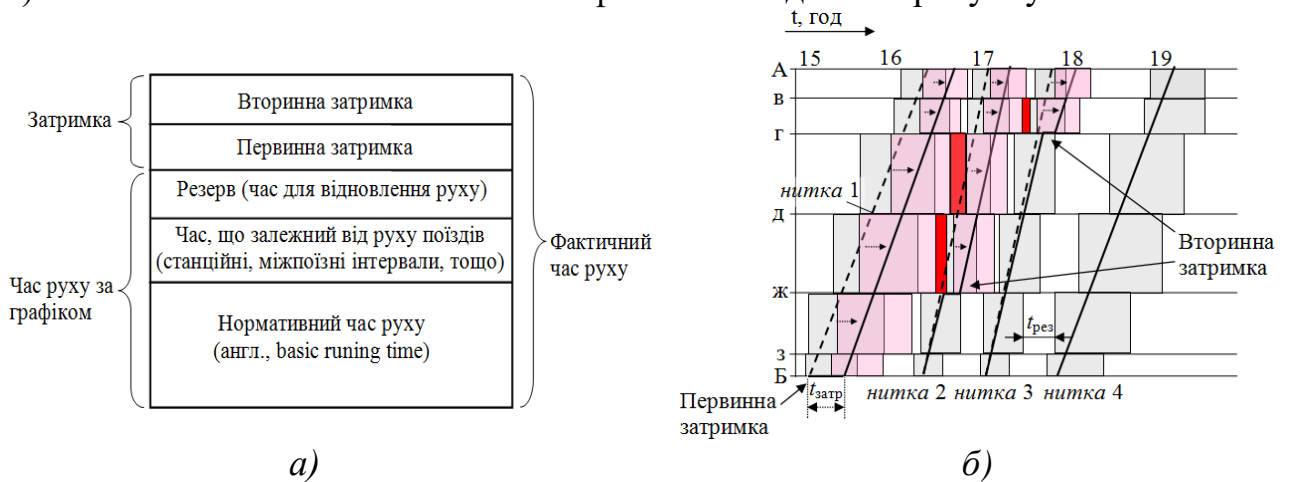


Рисунок 3 – Розповсюдження затримки у ГРП: а – складові фактичного часу руху поїзда; б – схема можливих конфліктів при виникненні затримки в русі

За результатами статистичного аналізу даних щодо тривалості затримок поїздів за перше півріччя 2016 р. на регіональній філії “Південна залізниця” ПАТ “Укрзалізниця” знайдено неперервні закони розподілу тривалості затримки за відправленням і прямуванням через дільницю (рис. 4.а, б).

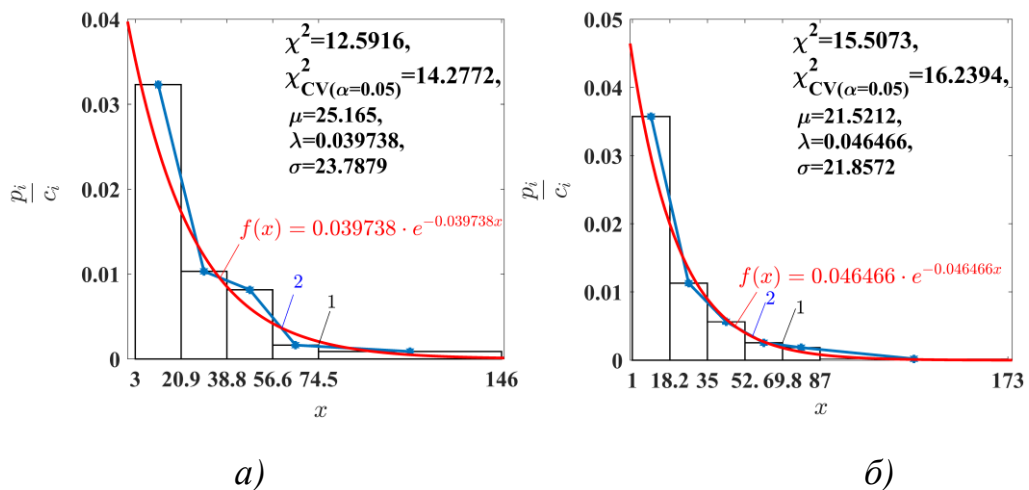


Рисунок 4 – Гістограма частот, емпірична (1) та теоретична (2) функції розподілу тривалості затримок поїздів: а – за відправленням; б – за прямуванням через дільницю

Встановлено, що тривалості затримок обох видів підпорядковуються експоненціальному розподілу з показниками за відправленням $\lambda_1=0,039738$, xv^{-1} і $\lambda_2=0,046466$, xv^{-1} за прямуванням через дільницю відповідно. Перевірка правдоподібності висунутих гіпотез про належність дослідних даних до заданого виду імовірнісного закону проводилася за допомогою критерію Пірсона.

У той час як первинні затримки є випадковими, які майже неможливо уникнути і передбачити, поширення вторинних затримок є процесом взаємопов'язаним, що являє собою так звану “каскадну затримку” або “ефект доміно”. Таким чином, знаючи розклад руху поїздів і тривалість первинної затримки, можна передбачити послідовно місце і тривалість виникнення каскаду вторинних затримок.

Метод дослідження впливу затримки поїздів у нормативному ГРП передбачає генерування первинних затримок поїздів на основі отриманих законів розподілу, побудову оптимального ГРП та виконання статистичного аналізу графіка, рисунок 5.

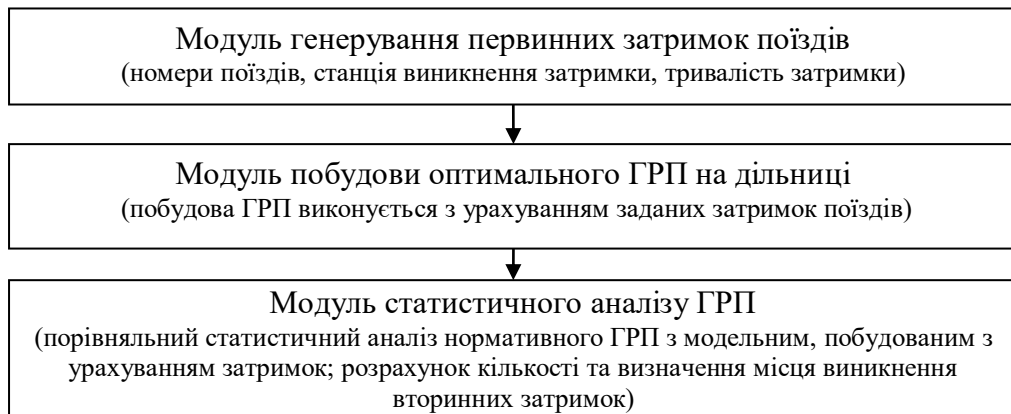


Рисунок 5 – Блок-схема методу моделювання розповсюдження затримок поїздів на залізничному напрямку

Враховуючи складність автоматизованого розрахунку ГРП для залізничного напрямку, реалізовано процедуру декомпозиції розрахунків по дільницях з ув'язкою даних дільниць за напрямком прокладання ниток графіка. Застосована процедура побудови ГРП передбачає прокладання ниток графіка відповідно до заздалегідь встановлених точок відправлення або прибуття поїздів різних категорій на станціях дільниці. В основу процедури було покладено сформовану математичну модель для автоматизованого розрахунку графіка руху поїздів, наведену в розділі 2. Підтримується режим побудови ГРП для одноколійних, двоколійних, одно-двоколійних дільниць з різними режимами прокладання поїздів : “у непарному напрямку”, “у парному напрямку”, “з обох напрямків”. Приклад схеми стикування на залізничному напрямку з використанням різних режимів прокладання ниток графіка наведено на рисунку 6.

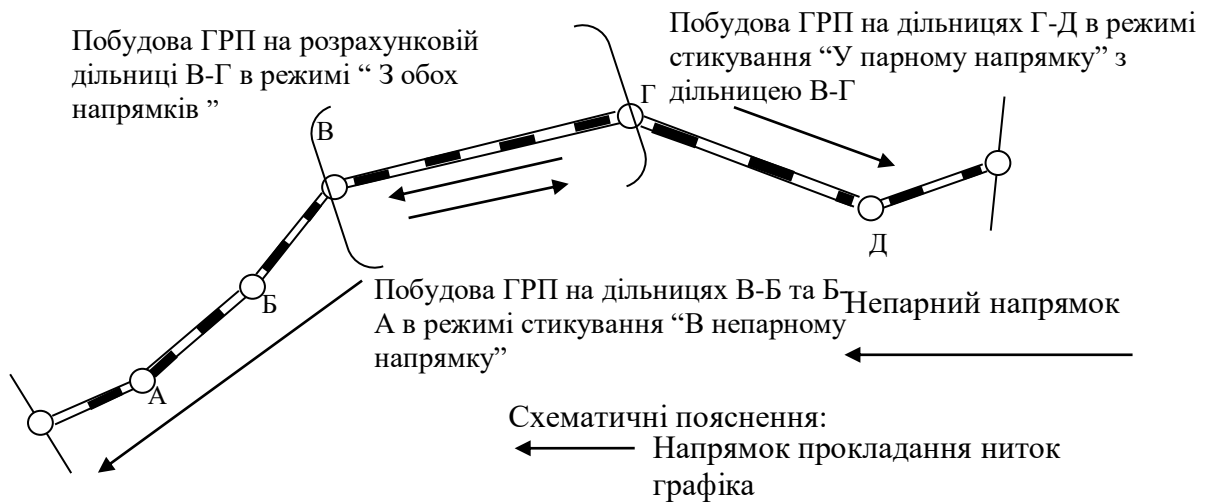


Рисунок 6 – Схема стикування дільниць на залізничному напрямку з використанням різних режимів прокладання ниток графіка

Вперше було створено механізм, який дозволяє графічно подати розповсюдження затримки в часі та просторі. Для прикладу на рисунку 7 наведено результати моделювання розповсюдження затримки поїзда 161 на 35 хв на реальному полігоні Південної залізниці.

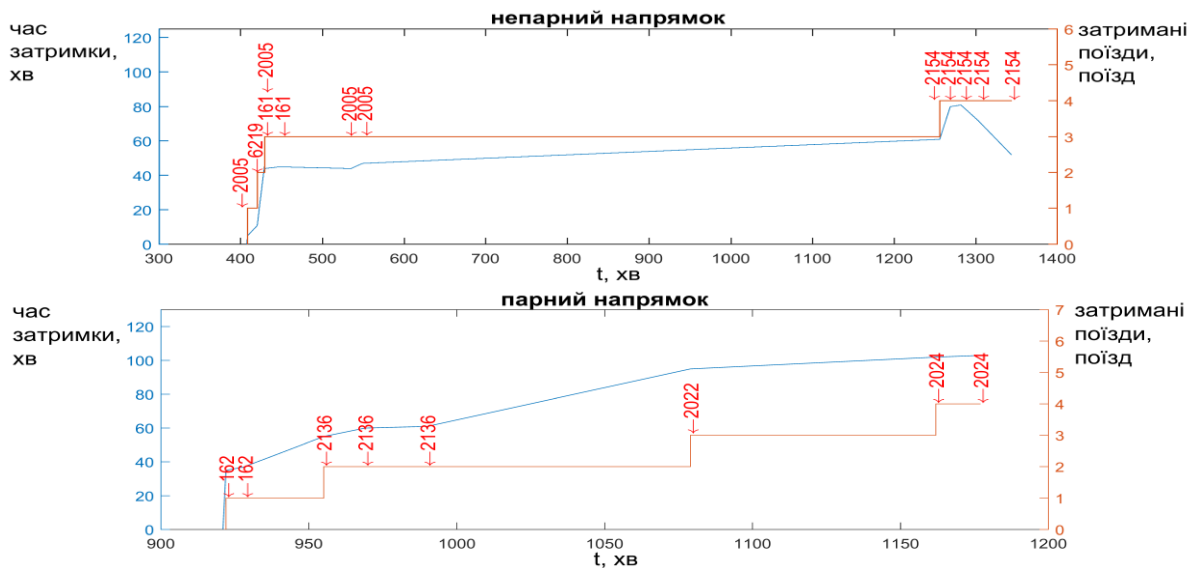


Рисунок 7 – Залежність кількості і тривалості затриманих поїздів з наростаючим підсумком від часу їх виникнення у графіку руху за сценарієм виникнення первинної затримки на 35 хв відповідно у непарному і парному напрямках руху

Для аналізу динаміки розвитку поширення затримки у графіку руху поїздів лінії, що досліджувалася, запропоновано візуалізувати отримані залежності тривалості затримки від часу їх виникнення у графіку руху за трьома сценаріями виникнення первинної затримки у тривимірному просторі (рис. 8).

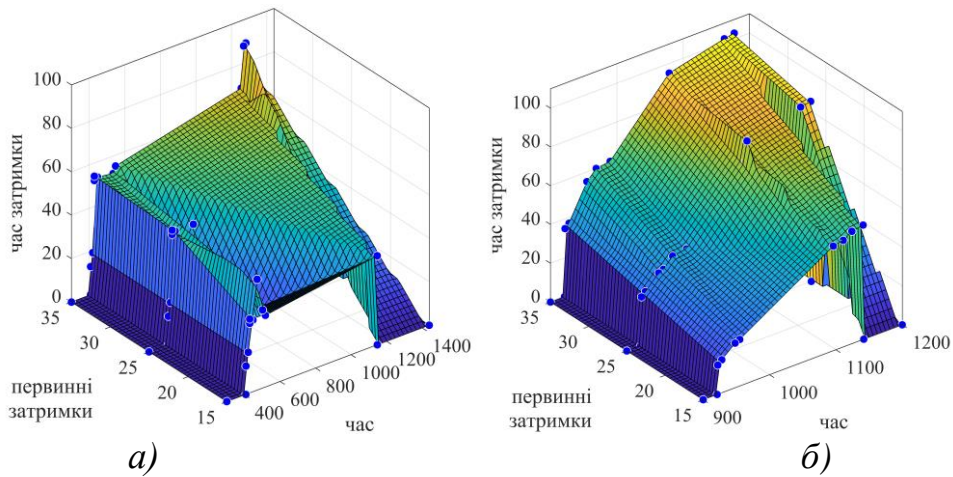


Рисунок 8 – Залежність тривалості затриманих поїздів з наростаючим підсумком від часу їх виникнення у графіку руху за сценарієм виникнення первинної затримки тривалістю 15, 25 та 35 хв: *а* – у непарному напрямку руху; *б* – у парному напрямку руху

Отримані результати поширення затримки дозволяють оцінити надійність існуючого нормативного графіка руху поїздів і надають можливість дослідити динаміку їх утворення. З аналізу залежності на рисунку 8 можна зробити висновок, що загальна затримка у парному напрямку більш тривала як за часом поширення, так і за величиною затриманих поїздів з наростаючим підсумком. Отримані результати моделювання відповідають реальним процесам, що відбуваються при взаємовпливі поїздів у ГРП, що розроблено.

Фрагмент нормативного ГРП, розробленого в середовищі Matlab і побудованого на основі розв’язання оптимізаційної моделі алгоритмом АВС, наведено на рис. 9.а. На рисунку 9.б подано результати знаходження кращих ниток поїздів у тривимірному просторі рішень та на рис. 9.в представлено графік залежності значень цільової функції від кількості ітерацій процедури АВС.

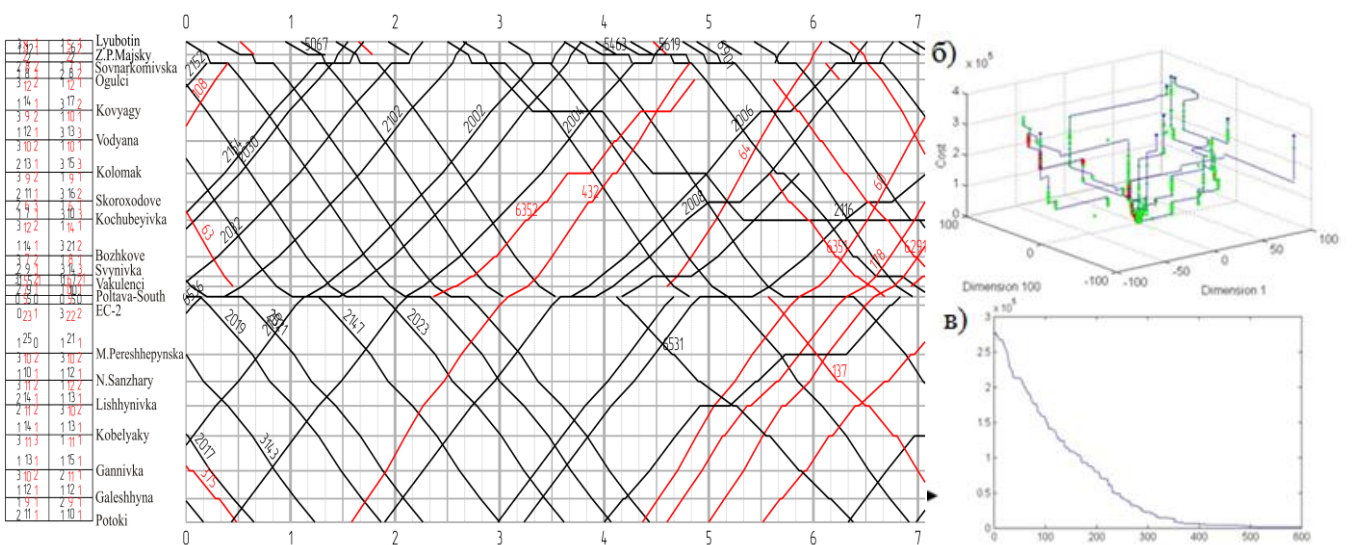


Рисунок 9 – Фрагмент нормативного ГРП (а), результати складання ниток ГРП за допомогою АВС (б) і графік залежності значень цільової функції від кількості ітерацій процедури АВС (в)

Проведений порівняльний аналіз розрахункових ГРП з діючими нормативними ГРП на основі експертних оцінок провідних інженерів-графістів підтверджує якість і адекватність отриманих графіків із застосуванням автоматизованих розрахунків.

У четвертому розділі запропоновано вимоги до автоматизованої системи складання та аналізу нормативного графіка руху поїздів. Попередній аналіз існуючого процесу планування перевезень на залізничній мережі України довів, що відсутнє єдине інформаційне середовище для реалізації процесу планування від подачі заявки до розроблення ГРП. Сформовано загальні вимоги формування автоматизованої системи складання та аналізу нормативного графіка руху поїздів. У якості інструменту реалізації автоматизованої системи складання графіка руху поїздів у єдиному інформаційному середовищі запропоновано розподілену систему підтримки прийняття рішень (СППР), яка об'єднує різні автоматизовані місця оперативного персоналу залізниці та працівників операторських компаній-перевізників і повинна в межах існуючих на залізниці України інформаційних ресурсів забезпечити вирішення задачі автоматизації складання, оперативного коригування та аналізу графіка руху поїздів.

Розроблено етапи процесу планування перевезень у системі автоматизованого складання та аналізу нормативного графіка руху поїздів на основі запропонованої концепції СППР. Описано процес планування в межах запропонованої СППР, що підтримує розроблення нормативного графіка руху поїздів як у довгостроковому (за 1 рік до введення в дію), так і короткостроковому (від 1 доби до кількох годин) періодах і мінімізує процес експертного складання ГРП, що є складним і не завжди ефективним.

Запропоновано такі режими функціонування СППР для автоматизованого складання та аналізу нормативного графіка руху поїздів на залізничних напрямках, заснованої на розроблених математичних моделях і методах: складання нормативного графіка руху поїздів; каталог ниток графіка, що складається на основі нормативного ГРП і являє собою сукупність готових маршрутів з визначеними параметрами маси поїзда та роду тяги; індивідуальний маршрут, що може бути прокладений за індивідуальним замовленням, але не менш як за добу до відправлення поїзного формування.

З метою економічного обґрунтування від впровадження розробленої в даному дисертаційному дослідженні автоматизованої технології складання нормативного графіка руху поїздів на залізничних напрямках виконано розрахунок економічного ефекту від проведених досліджень показників роботи залізничного напрямку Куп'янськ-Сорт. – Полтава-Півд. – Знам'янка-Сорт. – Чорноморська – Одеса-Сорт. в умовах зміни інтенсивності поїздопотоків за умови збільшення маршрутної швидкості та скорочення затримок поїздів на залізничному напрямку. Впровадження знайденого варіанта з раціональним використанням пропускної спроможності залізничного напрямку на мережі ПАТ “Укрзалізниця” дозволить отримати економічний ефект з наростаючим підсумком за п'ять років близько 376 млн грн.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі удосконалено процедуру складання нормативного графіка руху поїздів для залізничного напрямку на основі автоматизації розрахунків з побудови та аналізу розкладів руху пасажирських і вантажних поїздів з урахуванням інтересів незалежних перевізників. Це дозволить прокласти наскрізні нитки графіка для забезпечення узгодженого руху поїздопотоків на напрямку з одночасною оптимізацією параметрів руху поїздів інших категорій на дільницях. Основні результати та висновки полягають у наступному:

1. Аналіз умов функціонування залізничного транспорту України при діючій системі виконання ГРП довів велику значущість організації узгодженого руху поїздопотоків за розкладом для підвищення конкурентоспроможності залізниць України на ринку перевезень. Рівень виконання графіка руху поїздів впливає на основні якісні показники експлуатаційної роботи залізничного транспорту. На фоні падіння обсягів вантажних перевезень на 24 % у 2017 р. порівняно з 2011 р. спостерігається тенденція до збільшення середньої дальності перевезень вантажів. Виявлено негативну тенденцію, за якою у 2017 р. при падінні поїзної роботи до 90 млн поїздо-км (що менше на 21,3 % показника 2012 р.) дільнична швидкість всупереч транспортним залежностям також зменшилась до 37,9 км/год (або на 2,3 % порівняно з показником 2012 р.), що негативно позначається на швидкості доставки вантажів до замовників послуг залізничного транспорту і збільшує обіг рухомого складу. Для зміни ситуації важливим є впровадження автоматизованої технології розрахунку графіка руху поїздів на залізницях України.

2. Проведений аналіз збитків від затримок поїздів біля вхідних світлофорів з розподілом по регіональних філіях ПАТ “Укрзалізниця” за 2016 р. свідчить, що загальна кількість затриманих поїздів перед вхідними світлофорами складала 5466 випадків, у т. ч. 490 пасажирських. Загальний час затримок складав 1016,49 год, загальні збитки від затримок поїздів склали близько 914 тис. грн. Однією з причин виникнення затримок є вплив поїздів, що прямують із затримкою, на інші поїзди на дільниці, який можна зменшити або якого взагалі уникнути за рахунок підвищення якості складання нормативного графіка руху поїздів.

3. Проведений аналіз теоретичних підходів та існуючої процедури складання графіка руху поїздів у ПАТ “Укрзалізниця” довів, що діюча технологія розроблення ГРП на залізницях України заснована на дільничному методі, що виконується в ручному режимі та супроводжується значними витратами часу. Такий підхід не дозволяє знайти раціональний розклад руху поїздів з ув’язкою за дільницями залізничного напрямку. Для вибору раціонального варіанта наскрізного графіка руху поїздів на напрямку необхідно розробити процедуру автоматизованого розрахунку графіка руху поїздів на залізничному напрямку, що дозволить гарантувати високу достовірність і якість ГРП при заданих максимальних розмірах руху для кожної дільниці залежно від категорії поїздів, їхніх поїзних характеристик, технічних і технологічних обмежень інфраструктури.

4. Аналіз теоретичних та практичних досліджень щодо автоматизації розрахунку графіка руху поїздів свідчить про важливість підвищення значущості графіка руху поїздів як технологічної основи роботи окремих залізничних

напрямок. Аналіз підходів до автоматизації побудови ГРП дозволив виявити низку недоліків: напівавтоматизований розрахунок розкладів руху поїздів; при розрахунках не враховується можливість автоматизованої зміни розкладів руху пасажирських поїздів; відсутність можливості враховувати деталізовану заявку оператора на нитку графіка, включаючи часові та експлуатаційні параметри. В умовах реформування залізничного транспорту усунення цих недоліків може зробити процес розроблення та коригування ГРП більш гнучким, що дозволить власникам інфраструктури більш оперативно співпрацювати з операторами перевезень.

5. Для формалізації автоматизованої процедури побудови графіка руху поїздів розроблено оптимізаційну математичну модель на основі мінімізації сумарних витрат простою всіх поїздів, витрат на зупинку поїздів, рівня штрафу за невиконання директивних строків прибуття поїздів на станцію призначення та витрат на можливі затримки в реальних умовах руху, яка дозволяє з урахуванням різних запитів отримати раціональний розклад руху на кожній з дільниць залізничного напрямку для забезпечення узгодженого прямування поїздопотоків з відповідною системою обмежень, що враховує технічні та технологічні параметри інфраструктури.

6. Для оцінювання надійності графіка руху поїздів розроблено метод моделювання розповсюдження затримок поїздів на залізничному напрямку, що дозволяє отримати залежності еволюції динаміки розповсюдження затримок поїздів у часі та просторі. Аналіз отриманих результатів підтверджує відповідність моделювання реальним процесам, що відбуваються при взаємовпливі поїздів у виконаному графіка руху поїздів.

7. Для формування автоматизованої технології складання нормативного графіка руху поїздів на залізничному напрямку розроблено процедуру стикування залізничних дільниць, що передбачає декомпозицію розрахунків на основі розробленої оптимізаційної математичної моделі побудови ГРП по дільницям з ув'язкою цих дільниць за напрямком прокладання ниток графіка в різних режимах. Це дозволяє прискорити процедуру складання нормативного ГРП на залізничних напрямках великої протяжності.

8. Сформовано вимоги до автоматизованої системи розрахунку та аналізу графіка руху поїздів у межах інформаційного середовища системи АСК ВП УЗ-Є для зведення до мінімуму експертного підходу до складання графіка руху, що підвищить якість і швидкість складання та в подальшому надасть можливість проводити гнучкі розрахунки щодо надання маршрутів перевізникам різної форми власності, що набуває важливого значення в умовах впровадження відкритого доступу до залізничної інфраструктури.

9. Економічне обґрунтування запропонованих заходів доводить, що від проведених досліджень показників роботи залізничного напрямку Куп'янськ-Сорт. – Полтава-Півд. – Знам'янка-Сорт. – Чорноморська – Одеса-Сорт. в умовах зміни інтенсивності поїздопотоків на основі автоматизації розрахунку графіка руху поїздів і впровадження варіанта з раціональним використанням пропускної спроможності залізничного напрямку економічна ефективність з наростаючим підсумком за період 2017-2021 рр. становить близько 376 млн грн. Розрахунки ГРП

та моделювання розповсюдження затримок на залізничному напрямку довели, що в умовах перевантаження дільниці дільнична швидкість зменшиться на 25,5%, а загальна затримка збільшиться на 35,7% від режиму руху поїздопотоків в умовах раціонального завантаження.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні наукові праці:

1. Бутько Т.В., Прохорченко Г.О. Наукові підходи до формалізації процесу автоматизованого складання графіка руху вантажних поїздів. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2012. № 131. С.31-37.

2. Бутько Т.В., Прохорченко А.В., Прохорченко Г.О. Оцінка обчислювальної складності задачі автоматизації розрахунку графіку руху поїздів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені В.Даля*. 2014. № 3 (210). С.18 -21.

3. Бутько Т.В., Прохорченко Г.О. Формування процедури автоматизації розробки графіку руху поїздів на основі алгоритму штучних бджолиних колоній. *Збірник наукових праць ДНУЗТ ім.акад.В.Лазаряна «Транспортні системи та технології перевезень»*. 2015. №9. С.10-15.

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

4. Прохорченко Г.О., Семененко Р.І. Розробка процедури автоматизованої побудови графіку руху поїздів на залізничному напрямку *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2016. № 165.С. 26-34.

5. Прохорченко Г.О., Щербацька А.І., Ткачук М.М. Дослідження впливу величини резерву часу на надійність графіка руху швидкісних поїздів *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017. № 169.С. 205-213.

6. Butko T., Prokhorchenko A., Golovko T., Prokhorchenko G. Development of the method for modeling the propagation of delays in noncyclic train scheduling on the railroads with mixed traffic. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. №1, Issue 3 (91). P. 30-39. doi: 10.15587/1729-4061.2018.123141 (видання індексується у базі Scopus).

Праці апробаційного характеру:

7. Бутько Т.В., Прохорченко Г.О. Розроблення математичної моделі для побудови графіка руху поїздів на основі алгоритму штучних бджолиних колоній. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2013.№ 136. С. 378.

8. Бутько Т.В., Прохорченко А.В., Прохорченко Г.О. Автоматизація розробки графіку руху поїздів на основі алгоритму штучних бджолиних колоній. II *Міжнародна науково - технічна конференція "Обчислювальний інтелект - 2013 (результати, проблеми, перспективи) Computational Intelligence, ComInt – 2013"* Секція Прикладні аспекти інтелектуальних обчислень (м. Черкаси, 14-18 травня

2013). Збірник матеріалів 2-ї міжнародної науково-технічної конференції. – Черкаси: Маклаут, 2013. С.158.

9. Бутько Т.В., Прохорченко Г.О. Вимоги до формування автоматизованої системи розробки та аналізу графіку руху поїздів на залізницях України *Scientific researches and their practical application. modern state and ways of development* (м.Одеса 01-12 October 2013). Збірник наукових праць SWorld. № 3. Том 2. С.99-101.

10. Бутько Т.В., Прохорченко Г.О. Дослідження обчислювальної складності задачі автоматизації розрахунку графіка руху поїздів на одноколіній дільниці *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків.УкрДАЗТ, 2014.№ 143. С. 285-286.

11. Бутько Т.В., Прохорченко Г.О. Пошук ефективного алгоритму для розрахунку графіку руху поїздів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. УкрДАЗТ, 2014. №4 – С. 14.

12. Бутько Т.В., Прохорченко Г.О., Гой Т.А. Удосконалення системи планування вантажних перевезень на основі автоматизації розробки графіку руху. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. – Харків: УкрДАЗТ, 2015.№.151.т1 С.102.

13. Бутько Т.В., Прохорченко Г.О. Принципи розробки системи підтримки прийняття рішень для удосконалення процесу планування вантажних перевезень на залізницях України. *Інженерія поверхності и реновація изделий*. Матеріали 15-ї Міжнародної науково-технічної конференції (01-05 июня 2015 г., Одесская обл., Затока)- Киев:АТМ Украины, 2015. С.33-34.

14. Бутько Т.В., Прохорченко Г.О. Аналіз тенденцій розвитку ринку вантажних перевезень на залізницях світу та України. Харківський національний університет внутрішніх справ: матеріали 4-ї міжнародної науково-практичної конференції "Сучасні проблеми правового, економічного та соціального розвитку держави". (Харків, 2015р.) Харків, ХНУВС, 2015. С. 334-336.

15. Панченко С.В., Бутько Т.В., Пархоменко Л.О., Прохорченко Г.О. Формування автоматизованої системи розрахунку графіку руху поїздів на сітьовому рівні. Збірник тез міжнародної науково-практичної конференції «Інновації інфраструктури транспортно-логістичних систем. Проблеми, досвід, перспективи». Сєверодонецк,2016.С.137,138.

16. Бутько Т.В., Прохорченко Г.О., Москаленко О.В. Удосконалення побудови і аналізу графіка руху поїздів на основі моделювання розповсюдження затримок на залізничній мережі. Theses of International scientific conference «Globalization of scientific and educational space. Innovations of transport. Problems, experience, prospects». 3-12 May 2017, Dresden (Germany)-Paris (France).- Severodonetsk:Volodymyr Dahl East Ukrainian National I University. P.41-42.

17. Прохорченко Г.О., Щербацька А.І., Ткачук М.М. Удосконалення методу визначення резервів часу у графіку руху поїздів на швидкісних та високошвидкісних магістралях. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2017. №.169 (додаток). С.178-179.

АНОТАЦІЯ

Прохорченко Г.О. Формування автоматизованої технології складання нормативного графіка руху поїздів на залізничному напрямку. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.01 – транспортні системи. – Український державний університет залізничного транспорту МОН України, Харків, 2018.

Дисертацію присвячено питанню підвищення ефективності перевезень на залізничному транспорті України на основі автоматизації процедури складання нормативного графіка руху поїздів (ГРП) на залізничному напрямку. Формалізовано технологію складання ГРП при проведенні автоматизованих розрахунків, яка у вигляді оптимізаційної моделі вирішує задачу побудови ГРП, враховуючи можливі затримки в русі поїздів і технічні і технологічні обмеження інфраструктури з метою підвищення якості складання ГРП. Розроблено метод моделювання розповсюдження затримки у графіку руху поїздів на залізничному напрямку, який дозволяє врахувати взаємовплив поїздів у ГРП з метою підвищенні його точності та надійності. На основі моделі розроблено процедуру автоматизованого складання нормативного ГРП на залізничному напрямку, який надає можливість прокладання наскрізних ниток поїздів.

Для практичного застосування запропонованої автоматизованої технології складання нормативного ГРП на напрямку у вигляді комплексу методів і моделей розроблено вимоги до створення в ПАТ “Укрзалізниця” автоматизованої системи складання та аналізу графіка руху поїздів. Це дозволить в умовах великої кількості запитів на розроблення ниток графіка виключити довготривалий і трудомісткий процес складання ГРП.

Ключові слова: автоматизована технологія, графік руху поїздів, залізничний напрямок, теорія розкладів, розповсюдження затримки поїздів, алгоритм бджолиних колоній

АННОТАЦИЯ

Прохорченко Г.О. Формирование автоматизированной технологии составления нормативного графика движения поездов на железнодорожном направлении. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.01 – транспортные системы. – Украинский государственный университет железнодорожного транспорта МОН Украины, Харьков, 2018.

Диссертация посвящена вопросу повышения эффективности перевозок на железнодорожном транспорте Украины на основе автоматизации процедуры составления нормативного графика движения поездов (ГДП) на железнодорожном направлении.

Проведенный анализ условий функционирования железнодорожного транспорта Украины при действующей системе исполнения ГДП показал большую значимость организации перевозок маршрутных перевозок по расписанию для повышения конкурентоспособности железных дорог Украины на рынке перевозок.

Проведенным анализом существующих методов автоматизированного составления ГДП и существующей технологии составления ГДП выявлены недостатки, устранить которые возможно посредством внедрения автоматизации процесса составления ГДП.

Проведена оценка вычислительной сложности задачи автоматизированного составления ГДП. Доказано, что задача расчета ГДП по методу сужения может быть сведена до задачи разбиения и является NP-полной относительно числа конфликтов в расписании. Формализована технология составления ГДП при проведении автоматизированных расчетов, которая в виде оптимизационной модели решает задачу построения ГДП на железнодорожном участке, учитывая возможные задержки в движении поездов, технические и технологические ограничения инфраструктуры с целью повышения качества составления ГДП. Для решения разработанной оптимизационной модели расчета оптимального ГДП в диссертационной работе предложено применить один из методов мультиагентной оптимизации – алгоритм искусственных пчелиных колоний (англ., Artificial Bee colony Algorithm, ABC). Эффективность алгоритма искусственных пчелиных колоний обусловлена тем, что, в отличие от классических методов, которые являются высокоитеративными и предъявляют определенные требования к целевой функции, он характеризуется большей скоростью нахождения решения, не подвержен закликиванию на локальных экстремумах и не выдвигает требований к зависимостям, которые исследуются. На основе предложенной оптимизационной математической модели разработана процедура автоматизированного стыкования железнодорожных участков для составления нормативного ГДП на железнодорожном направлении, которая дает возможность прокладки сквозных ниток графика поездов при разных режимах расчета: “с обеих сторон”, “в четном направлении”, “в нечетном направлении”. Разработан метод моделирования распространения задержки в графике движения поездов на железнодорожном направлении, который позволяет учесть взаимовлияние поездов в ГДП с целью повышения его точности и надежности, рассчитать параметры распространения задержки. Для возможности моделирования распространения задержки в нормативном ГДП проведен статистический анализ данных о продолжительности задержек поездов на региональном филиале "Южная железная дорога" ПАО “Укрзализныця”. Установлено, что длительности задержек по отправлению и следованию через участок подчиняются экспоненциальному распределению. Предложено генерировать первичные задержки в соответствии с найденными законами распределения с последующим моделированием распространения вторичных задержек в ГДП, что является процессом взаимосвязанным, представляющим собой так называемую "каскадную задержку".

Для практического применения предложенной автоматизированной технологии составления нормативного ГДП на направлении в виде комплекса методов и моделей разработаны требования к созданию в ПАО “Укрзализныця” автоматизированной системы составления и анализа графика движения поездов. В качестве инструмента реализации автоматизированной системы составления ГДП в единой информационной среде предложена распределенная система поддержки принятия решений (СППР), которая объединяет различные автоматизированные

места оперативного персонала железной дороги и работников операторских компаний-перевозчиков и должна в пределах существующих на железной дороге Украины информационных ресурсов обеспечить решение задачи автоматизации сборки, оперативной корректировки и анализа графика движения поездов. Это позволит в условиях большого количества запросов на разработку нитей графика исключить длительный и трудоемкий процесс составления ГДП.

Ключевые слова: автоматизированная технология, график движения поездов, железнодорожное направление, теория расписаний, распространение задержки поездов, алгоритм пчелиных колоний.

ABSTRACT

H. Prokhorchenko. Formation of automated technology for compilation the standard timetable graph on the railway direction—Manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Science in speciality 05.22.01 —transport systems. — Ukrainian State University of Railway, MES of Ukraine, Kharkiv, Kharkiv 2018.

The dissertation is devoted to the issue of increasing the efficiency of transportation in the railway transport of Ukraine on the basis of automation of the procedure for compilation the standard timetable graph (TTG), on the railway direction. The formalized technology of compilation of TTG in the course of automated calculations, which, in the form of an optimization model, solves the problem of construction of TTG, taking into account possible delays in the movement of trains and technical and technological limitations of infrastructure in order to improve the quality of the assembly of TTG. On the basis of the model, the procedure for automated compilation of TTG in the railway direction, which provides the possibility of laying cross-threads of trains. The method of modeling the delay distribution in the trajectory train schedule on the railway is developed, which allows taking into account the interactions of trains in the fracturing system in order to increase its accuracy and reliability.

For the practical application of the proposed automated technology for the assembly of standard timetable graph in the direction of a complex of methods and models, requirements have been developed for the creation in the JSC "Ukrzaliznytsya" of an automated system of compilation and analysis of the train traffic schedule. This will allow, in the conditions of a large number of requests for the development of threads of the graph, to exclude the long and laborious process of compilation the standard timetable graph.

Keywords: automated technology, the standard timetable graph, railway direction, delay propogation, scheduling theory, algorithm of bee colonies.

ПРОХОРЧЕНКО ГАЛИНА ОЛЕГІВНА

УДК 656.222.4:681.5

**ФОРМУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ СКЛАДАННЯ
НОРМАТИВНОГО ГРАФІКА РУХУ ПОЇЗДІВ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ
НАПРЯМКУ**

05.22.01 – транспортні системи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Відповідальний за випуск



доц. Малахова О. А.

Підписано до друку "24" травня 2018 р.
Формат паперу 60×84 1/16. Папір для множних апаратів.
Умовн. – рук. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 1,1
Замовлення № 187. Тираж 150 прим.

Видавництво УкрДУЗТ. Свідоцтво ДК № 6100 від 21.03.2018 р.
Друкарня УкрДУЗТ: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7