

Український державний університет залізничного транспорту  
Міністерства освіти і науки України

Український державний університет залізничного транспорту  
Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

ПРОХОРЧЕНКО ГАЛИНА ОЛЕГІВНА

УДК 656.222.4:681.5

**ДИСЕРТАЦІЯ**

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

05.22.01 – транспортні системи

27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Г.О.Прохорченко

Науковий керівник

БУТЬКО Тетяна Василівна,  
доктор технічних наук, професор

Харків – 2018

## АНОТАЦІЯ

*Прохорченко Г.О.* Формування автоматизованої технології складання нормативного графіка руху поїздів на залізничному напрямку. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.01 – «Транспортні системи» (275 – Транспортні технології). – 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 на залізничному напрямку.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у вирішенні наукового завдання удосконалення процедури складання нормативного графіка руху поїздів для залізничного напрямку шляхом автоматизації розрахунків з побудови та аналізу розкладів руху пасажирських та вантажних поїздів з урахуванням інтересів незалежних перевізників.

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 ділянок 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 графіка руху, що підвищить якість та швидкість складання, та в подальшому надасть можливість проводити гнучкі розрахунки щодо надання маршрутів перевізникам різної форми власності.

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 реальних умов руху, і як, наслідок, надійність просування поїздопотоків. Розроблений комплекс методів та 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.

Розроблена технологія та сформований комплекс методів і моделей використовуються при організації роботи регіональної філії “Придніпровська залізниця” ПАТ “Укрзалізниця” та в навчальному процесі Інституту перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ). Практичне впровадження результатів роботи підтверджується актами впровадження.

За темою 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), 11 тез доповідей на наукових конференціях.

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

Перший розділ присвячено аналізу чинників, що безпосередньо впливають на показники роботи залізничного транспорту в цілому та на показники виконання графіка руху поїздів, аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду підходів до формалізації процедури складання ГРП.

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. Виявлено, що при зменшенні кількісного показника поїздо-кілометрів спостерігається збільшення дільничної швидкості поїздів, що суперечить транспортним закономірностям та 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., та 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”. Проведено аналіз збитків від затримок поїздів біля вхідних сигналів станцій ПАТ “Укрзалізниця”, виявлено, що однією з причин даної ситуації є неналежна якість складання нормативного ГРП.

Проведений аналіз існуючих методів автоматизованої побудови ГРП та існуючої процедури складання ГРП у ПАТ “Укрзалізниця”, який довів наявність недоліків в існуючій процедурі. Зроблено висновки щодо усунення виявлених недоліків за допомогою впровадження автоматизації технології складання ГРП.

Другий розділ присвячено формалізації процедури складання графіка руху поїздів при проведенні автоматизованих розрахунків з урахуванням інтересів незалежних перевізників в умовах здійснення маршрутних перевезень.

Проведено оцінку 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 числа конфліктів у розкладі. Спираючись на складність задачі, розроблено оптимізаційну математичну модель розрахунку ГРП на дільниці із застосуванням мультиагентного методу оптимізації, що дозволяє знаходити ГРП, близький до оптимального, протягом прийняттого часового інтервалу.

В якості критерію оцінювання варіантів ГРП прийнято мінімум сумарних витрат на вартість простоїв всіх 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.

Обмеження математичної моделі дозволяють врахувати логічні обмеження при прокладанні ниток поїздів через перегони, дотримання міжпоїзних та станційних інтервалів, раціональне використання пропускнуої спроможності дільниці, наявність необхідного числа колій на роздільних пунктах та інші технічні й технологічні обмеження при проходженні поїздів через дільницю.

Для вирішення задачі розрахунку оптимального ГРП запропоновано застосувати один з методів мультиагентної оптимізації – алгоритм штучних бджолиних колоній (англ., Artificial Bee colony Algorithm, ABC). Адаптуючи принципи живої природи до поставленої задачі автоматизованого розрахунку ГРП, запропоновано представити процес пошуку найкращого джерела нектару колонією бджіл як процедуру побудови оптимального ГРП. 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 варіанту

нормативного ГРП з урахуванням надійності слідування поїздопотоків через дільницю. Метод було реалізовано у вигляді програмного забезпечення.

Третій розділ присвячено розробленню методу дослідження розповсюдження затримок поїздів у ГРП та процедури автоматизованого складання ГРП на залізничному напрямку. Для оцінювання функції в математичній моделі розрахунку ГРП, що дозволяє визначити сумарну затримку всіх поїздів в графіка в залежності від випадкової затримки, що виникає в реальних умовах руху, було розроблено метод моделювання розповсюдження затримок у ГРП. 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. На основі методів візуалізації даних вперше було створено механізм, який дозволяє графічно представити розповсюдження затримки в часі та просторі. Отримані результати поширення затримки дозволяють оцінити надійність рівня виконання існуючого нормативного графіка руху поїздів та надають можливість дослідити динаміку їх утворення. Результати моделювання відповідають реальним процесам, що відбуваються при взаємовпливі поїздів у виконаному графіку руху поїздів. Проведений порівняльний аналіз розрахункових ГРП з діючими нормативними ГРП на основі експертних оцінок провідних інженерів-графістів підтверджує якість та адекватність отриманих графіків із застосування автоматизованих розрахунків.

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 основі процедури було покладено сформовану математичну модель для автоматизованого розрахунку графіка руху поїздів, наведену в розділі 2.

Четвертий розділ присвячено розробці вимог 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 розробки ГРП. Сформовано загальні принципи побудови автоматизованої системи складання та аналізу нормативного графіка руху поїздів. Інструментом реалізації автоматизованої системи складання графіка руху поїздів в єдиному інформаційному середовищі запропоновано систему підтримки прийняття рішень (СППР), яка об'єднує різні автоматизовані місця оперативного персоналу залізниці та працівників операторських компаній-перевізників, та повинна в межах існуючих на залізниці України інформаційних ресурсів забезпечити вирішення задачі автоматизації складання, оперативного коригування та аналізу графіка руху поїздів.

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. – Одеса-Сорт в умовах зміни інтенсивності поїздопотоків за умови збільшення маршрутної швидкості та скорочення затримок поїздів на залізничному напрямку.

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

#### Список публікацій здобувача

##### **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 одноколіїній 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-й Международной научно-технической конференции (01-05 июня 2015 г., Одесская обл., Затока)- Киев:АТМ Украины, 2015. С.33-34.

14. Буцько 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., Буцько 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. Буцько 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 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.

## ABSTRACT

*Prokhorchenko G. O.* Formation of automated technology for creating the target timetable graph (TTG) in the railway line. - Qualifying scientific work – manuscript copyright.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences (PhD in technical sciences) in specialty 05.22.01 – “Transport systems” (275 - Transport technologies). - Ukrainian State University of Railway Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The dissertation deals with the issue of increasing the efficiency of transportation on the Ukrainian railway transport using automation of the procedure for creating the target timetable graph (TTG) in the railway line.

The scientific novelty of the dissertation is in solving the scientific problem of improving the procedure for creating a standard TTG for the railway line by automation of calculations for drawing up and analyzing timetables for passenger and freight trains under due consideration of the interests of independent carriers.

For the first time:

- an optimization mathematical model has been developed to form the automated technology for creating the target TTG based on the minimization of the total costs of idle hours of all trains, the cost of train stops, the amount of fines for a breach of the scheduled arrival time of trains to the destination station and the costs of possible delays in the actual traffic conditions, which allows obtaining a rational railway traffic timetable to ensure route transportation with an appropriate system of restrictions that takes into account both technical and technological parameters of the infrastructure;

- a simulation method for the distribution of train delays in the railway has been developed to estimate the reliability of the trains scheduling for the route transportation generated by automated calculations, which allows to obtain the dependencies of the evolution of the change of train delays in time and space.

### Improvements:

- a complex of functional tasks of ASK VP UZ-E system on the basis of formation of an automated system for calculation and analysis of TTG on the railway line to minimize the expert approach to drawing up a traffic schedule that will increase the quality and shortens the time of drawing up, and further will provide an opportunity to conduct flexible calculations to provide routes to carriers of different forms of ownership.

The practical results of the work consist in solving the application task of the automated creation of the TTG on the railway line, that allows increasing the efficiency, in particular, the accuracy of transportation in accordance with the desired time of goods delivery to the destination station, while minimizing non-productive idle hours and taking into account the actual conditions of the traffic, and, consequently, reliability of train traffic. The developed complex of techniques and mathematical models allows automated constructing a target TTG at individual sections, while the formed method of matching of the adjacent sections enables to organize through-running trains in the particular direction.

The developed technology and the formed set of techniques and models are used in the organization of operation of Pridneprovskaya Zalznitsa Regional Branch of Ukrzaliznytsya PJSC and in the educational process of the Institute of Retraining and Advanced Personnel Training of the Ukrainian State University of the Railway Transport (UkrSURT). The practical implementation of work results is confirmed by the implementation certificates.

Seventeen scientific works have been published on the topic of the dissertation, including 6 articles, which are published in the professional scientific journals approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine (three articles were included to the international scientometric databases, one of them is included in the Scopus database), 11 report abstracts at scientific conferences.

In the introduction, the relevance of the topic is substantiated, the purpose and objectives of the research are formulated, the scientific novelty and practical value are shown, and the general description of the work is given.

Part 1 deals with the analysis of factors that directly affect the general performance of the railway transport and the indicators of compliance with the TTG, analysis of domestic and foreign experience of approaches to formalizing the procedure for drafting the TTG.

The main quantitative and qualitative indicators of the railway transport operation have been analyzed. Since in 2014-2017, the volume of railway transportation has been reduced, a tendency of gradual deterioration of the quality performance indicators, in particular, the turnover of freight cars, has been determined. It was found that with a decrease in the quantitative train-kilometers indicator, the speed of trains at individual railway section increases, which contradicts the transport laws and shows that the main reason of deterioration of quality indicators is the reduced efficiency of the existing technology of transportation organization. A tendency of the growth of transportation distances since 2011 has been identified, as well as the importance of the interconnected train traffic through the main railways connecting the main industrial areas of the country with international land and maritime corridors. The reliability of the implementation of TTG at Ukrzaliznytsya PJSC has been analyzed. The analysis of losses caused by train delays at the entrance signals of Ukrzaliznytsya PJSC stations has been conducted, and it has been identified that one of the reasons for this situation is the inadequate quality of the creation of the target TTG.

The existing methods of automated creation of the TTG and the existing procedure for creation of TTG in Ukrzaliznytsya PJSC have been analyzed. The analysis has revealed deficiencies of the existing procedure. The conclusions about the elimination of the revealed deficiencies by introduction of the automated technology of TTG creation have been made.

Part 2 deals with the formalization of the procedure for creation of the timetable graph when automated calculations are conducted taking into account the interests of independent carriers in the conditions of route transportation.

The computational complicacy of the task of automated creation of TTG has been estimated. It is proved that the task of TTG calculation by the restriction method

can be reduced to the partition problem and is NP-complete with respect to the number of conflicts in the schedule. With regard to the complexity of the problem, an optimization mathematical model for TTG calculating at the railway section using the multi-agent optimization method has been developed, which allows finding a nearly optimal TTG within a reasonable time interval.

The minimum total expenditures for the idle hour cost for all trains at the railway section, the cost of train stops, the amount of fines for a breach of the scheduled arrival time of trains to the destination station and the costs of possible delays in the actual traffic conditions have been adopted as evaluation criteria for the TTG options.

Limitations of the mathematical model allow taking into account logical constraints while planning the train routes through the running line, observance of inter-station and station intervals, rational using the train-handling capacity, availability of the required number of tracks at interstations, and other technical and technological restraints related to the passage of trains through the station.

Using one of the multi-agent optimization methods – the artificial bee colony algorithm (ABC) – has been proposed to solve the problem of calculating the optimal TTG. By adjusting the principles of wildlife to the set task of automated TTG calculation, presenting a process of searching for the best source of nectar by a bee colony as a procedure for constructing the optimal TTG is proposed. The creation of the TTG within the ABC is an iteration process during which the timetable is developed followed by a simulation modeling of the distribution of random delays in this schedule to determine the total costs for delays of all trains. With this approach, the most acceptable option of the target TTG with taking into account the reliability of the passage of trains through the railway section is searched for. The method was implemented as a software application.

Part 3 describes the development of a method for studying the train delay distribution in the TTG and the procedure for the automated creation of TTG in the railway line. A method for modeling the delay distribution in the TTG system was developed to evaluate the function in the mathematical model of the TTG calculation,

which allows determining the total delay of all trains in the timetable graph, depending on the random delay occurring in the real traffic conditions. The method of studying the effect of train delay in the normative TTG provides the generation of primary train delays based on the obtained distribution laws, the creation of an optimal TTG and the performing statistical analysis of the timetable graph. A mechanism that allows graphical representation of the delay distribution in time and space was created for the first time based in the data visualization methods. The obtained results of the delay distribution allow assessing the reliability of the level of compliance with the existing target TTGs and provide an opportunity to investigate the change of their formation. The simulation results are consistent with the actual processes that occur during interacting of trains in the TTG. The comparative analysis of the calculated TTG with the current target TTG on the basis of expert assessments by leading timetable graph engineers confirms the quality and relevance of the graphs obtained using the automated calculations.

In view of the complication of the automated calculation of the TTG for the railway line, the procedure for calculation decomposing at the railway sections followed by combining of the data from the railway sections along the direction of lines of the graph has been implemented. The applied procedure of creation of the TTG provides for drawing up the timetable lines in accordance with predetermined points of departure or arrival of trains of various categories at stations of the sections. The procedure is based on the developed mathematical model for the automated calculation of the TTG described in Part 2.

Part 4 comprises the development of requirements for an automated system of creation and analysis of the target TTG. The preliminary analysis of the existing transportation planning process at the Ukrainian railway network has proved that common information environment for the implementation of the planning process from the application to the development of the TTG is unavailable. The general principles of the design of an automated system of creation and analysis of the target TTG have been formed. A decision support system (DSS) was proposed as a tool for implementing the automated system for drawing TTG in the common information

environment. DSS combines multiple automated locations of the operational personnel of the railway and employees of the carriers, and should provide for solving tasks of automated creation, online adjustment and analysis of the TTG within the existing information resources on the Ukrainian railway.

For the economic rationale of the introduction of the developed in this dissertation research automated technology of drafting of the target TTG in the railway line, the economic effect was calculated from the conducted researches of the performance indicators of the railway line Kupyansk-Sortuvalna - Poltava-Pivdenna - Odessa-Sortuvalna with the changing intensity of train traffic provided that the route speed increases and the train delays are reduced in the railway line.

Keywords: automated technology, timetable graph, railway line, theory of scheduling, train delay distribution, artificial bee colony algorithm.

#### List of candidate's publications

##### **References:**

1. Butko T.V., Prokhorchenko G.O. Naukovi pidkhody do formalizatsii protsesu avtomatyzovanoho skladannia hrafika rukhu vantazhnykh poizdiv. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoi derzhavnoi akademii zaliznychnoho transportu*. 2012. №131. S.31-37.
2. Butko T.V., Prokhorchenko A.V., Prokhorchenko G.O. Otsinka obchysliuvalnoi skladnosti zadachi avtomatyzatsii rozrakhunku hrafiku rukhu poizdiv. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni V.Dalia*. 2014. № 3 (210). S.18 -21.
3. Butko T.V., Prokhorchenko G.O. Formuvannia protsedury avtomatyzatsii rozrobky hrafiku rukhu poizdiv na osnovi alhorytmu shtuchnykh bdzholynykh kolonii. *Zbirnyk naukovykh prats DNUZT im.akad.V.Lazariana «Transportni systemy ta tekhnolohii perevezen»*. 2015. №.9. S.10-15.

*Publicatuons in the Ukrainian journals included into the international scientometric databases:*



4. Prokhorchenko G.O., Semenenko R.I. Rozrobka protsedury avtomatyzovanoi pobudovy hrafiku rukhu poizdiv na zaliznychnomu napriamku. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainiskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu*. 2016. № 165.S. 26-34.

5. Prokhorchenko G.O., Shcherbatska A.I., Tkachuk M.M. Doslidzhennia vplyvu velychyny rezervu chasu na nadiinist hrafika rukhu shvydkisnykh poizdiv *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainiskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu*. 2017. № 169.S. 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.

***Articles which demonsrtate approval of the thesis materials:***

7. Butko T.V, Prokhorchenko G.O. Rozroblennia matematychnoi modeli dlia pobudovy hrafika rukhu poizdiv na osnovi alhorytmu shtuchnykh bdzholynykh kolonii. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoi derzhavnoi akademii zaliznychnoho transportu*. 2013.№ 136. S. 378.

8. Butko T.V., Prokhorchenko A.V., Prokhorchenko G.O. Avtomatyzatsiia rozrobky hrafiku rukhu poizdiv na osnovi alhorytmu shtuchnykh bdzholynykh kolonii. II Mizhnarodna naukovo - tekhnichna konferentsiia "Obchysliuvalnyi intelekt - 2013 (rezultaty, problemy, perspektyvy) Computational Intelligence, ComInt – 2013" Sektsiia Prykladni aspekty intelektualnykh obchyslen (m. Cherkasy, 14-18 travnia 2013). *Zbirnyk materialiv 2-yi mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii*. – Cherkasy: Maklout, 2013. S.158.

9. Butko T.V., Prokhorchenko G.O. Vymohy do formuvannia avtomatyzovanoi systemy rozrobky ta analizu hrafiku rukhu poizdiv na zaliznytsiakh Ukrainy *Scientific researches and their practical application. modern state and ways of development* (m.Odesa 01-12 October 2013). *Zbirnyk naukovykh prats SWorld*. № 3. Tom 2. S.99-101.

10. Butko T.V., Prokhorchenko G.O. Doslidzhennia obchysliuvalnoi skladnosti zadachi avtomatyzatsii rozrakhunku hrafika rukhu poizdiv na odnokoliinii dilnytsi *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoi derzhavnoi akademii zaliznychnoho transportu*. Kharkiv.UkrDAZT, 2014.№ 143. S. 285-286.

11. Butko T.V., Prokhorchenko G.O. Poshuk efektyvnoho alhorytmu dlia rozrakhunku hrafiku rukhu poizdiv. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*. UkrDAZT, 2014. №4 – S. 14.

12. Butko T.V., Prokhorchenko G.O., Hoi T.A. Udoskonalennia systemy planuvannia vantazhnykh perevezen na osnovi avtomatyzatsii rozrobky hrafiku rukhu. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoi derzhavnoi akademii zaliznychnoho transportu*. Kharkiv: UkrDAZT, 2015.№.151.t1 S.102.

13. Butko T.V., Prokhorchenko G.O. Pryntsypy rozrobky systemy pidtrymky pryiniattia rishen dlia udoskonalennia protsesu planuvannia vantazhnykh perevezen na zaliznytsiakh Ukrainy. *Ynzheneryia poverkhnosty y renovatsiia yzdelyi*. Materyal 15-y Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnycheskoi konferentsyy (01-05 yiunia 2015 h., Odessaia obl., Zatoka)- Kyev:ATM Украины, 2015. S.33-34.

14. Butko T.V., Prokhorchenko G.O. Analiz tendentsii rozvytku rynku vantazhnykh perevezen na zaliznytsiakh svitu ta Ukrainy. Kharkivskiy natsionalnyi universytet vnutrishnikh sprav: materialy 4-yi mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "*Suchasni problemy pravovoho, ekonomichnoho ta sotsialnoho rozvytku derzhavy*". (Kharkiv, 2015r.) Kharkiv, KhNUVS, 2015. S. 334-336.

15. Panchenko S.V., Butko T.V., Parkhomenko L.O., Prokhorchenko G.O. Formuvannia avtomatyzovanoi systemy rozrakhunku hrafiku rukhu poizdiv na sitovomu rivni. *Zbirnyk tez mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Innovatsii infrastruktury transportno-lohistychnykh system. Problemy, dosvid, perspektyvy»*. Sievierodonetsk,2016.S.137,138.

16. Butko T.V., Prokhorchenko G.O., Moskalenko O.V. Udoskonalennia pobudovy i analizu hrafika rukhu poizdiv na osnovi modeliuвання rozpovsiudzhennia zatrymok na zaliznychnii merezhi. 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 University. P.41-42.

17. Prokhorchenko G.O., Shcherbatska A.I., Tkachuk M.M. Udoskonalennia metodu vyznachennia rezerviv chasu u hrafiku rukhu poizdiv na shvydkisnykh ta vysokoshvydkisnykh mahistraliakh. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnogo universytetu zaliznychnoho transportu.* Kharkiv: UkrDUZT, 2017.№.169(dodatok).S.178-179.

## ЗМІСТ

Вступ	23
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ ПРИ ДІЮЧІЙ СИСТЕМІ ВИКОНАННЯ ГРАФІКА РУХУ ПОЇЗДІВ	31
1.1. Дослідження результатів операційної діяльності залізничного транспорту загального користування України в умовах реформування	31
1.2. Аналіз надійності виконання графіка руху поїздів на залізничній мережі ПАТ “Укрзалізниця”	39
1.3. Аналіз існуючої процедури складання графіка руху поїздів на залізничній мережі України	43
1.4. Аналіз наукових досліджень щодо автоматизованого складання графіка руху поїздів та моделювання затримок поїздів	46
1.5. Висновки до розділу 1	56
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ПОБУДОВИ НОРМАТИВНОГО ГРАФІКА РУХУ ПОЇЗДІВ НА ОСНОВІ МЕТОДУ МУЛЬТИАГЕНТНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ	58
2.1. Оцінка обчислювальної складності задачі автоматизації побудови графіка руху поїздів	58
2.2. Розробка математичної моделі автоматизованого розрахунку графіка руху	64
2.3. Розв’язання оптимізаційної математичної моделі побудови графіка руху поїздів за допомогою алгоритму штучних бджолиних колоній	71
2.4. Висновки до розділу 2	79
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОВСЮЖДЕННЯ ЗАТРИМОК ПОЇЗДІВ ТА РОЗРОБКА ПРОЦЕДУРИ АВТОМАТИЗОВАНОГО СКЛАДАННЯ ГРАФІКА РУХУ ПОЇЗДІВ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ НАПРЯМКУ	81
3.1. Теоретичні передумови розробки методу моделювання розповсюдження затримки у графіку руху поїздів	81

3.2. Розробка процедури автоматизованого складання графіка руху поїздів на залізничному напрямку	89
3.3. Експериментальні дослідження розповсюдження затримки у нормативному графіка руху для залізничного напрямку	97
3.4. Висновки до розділу 3	105
<b>РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ВИМОГ ДО ФОРМУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ СКЛАДАННЯ ТА АНАЛІЗУ ГРАФІКА РУХУ ПОЇЗДІВ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ НАПРЯМКУ ТА ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ</b>	<b>107</b>
4.1. Загальні принципи формування системи підтримки прийняття рішень для автоматизованого складання та аналізу графіка руху поїздів	107
4.2. Розробка вимог до формування системи підтримки прийняття рішень в межах автоматизованої системи складання та аналізу графіка руху поїздів на залізничній мережі України	113
4.3. Функції та програмна реалізація СППР для автоматизованого процесу складання графіка руху поїздів на мережі ПАТ “Укрзалізниця”	115
4.4. Економічне обґрунтування від встановлення раціональної межі завантаження залізничного напрямку на основі автоматизації побудови графіка руху поїздів	119
4.5. Висновки до розділу 4	129
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	<b>135</b>
Додаток А Програмна реалізація методу моделювання розповсюдження затримки у нормативному графіка руху поїздів	150
Додаток Б Програмна реалізація математичної моделі розрахунку графіка руху поїздів	155
Додаток В Процедура дослідження показників роботи залізничного напрямку Куп’янськ-Сорт – Основа – Полтава-Півд. – Знам’янка-Сорт – Чорноморська – Одеса-Сорт в умовах зміни інтенсивності поїздопотоків на основі автоматизації розрахунку графіку руху поїздів	163

Додаток Г Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	178
Додаток Д Акти впровадження	183

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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 графіка 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 графіка 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.
4. Прохорченко Г.О., Семененко Р.І. Розробка процедури автоматизованої побудови графіка 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.
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 графіка руху поїздів на основі алгоритму штучних бджолиних колоній. П *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 графіка 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 одноколіїній 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 графіка 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 графіка 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. *Инженерия поверхности и реновация изделий*. Материалы 15-й Международной научно-технической



- конференції (01-05 июня 2015 г., Одесская обл., Затока)- Киев:АТМ України, 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 графіка руху поїздів на сітьовому рівні. Збірник тез міжнародної науково-практичної конференції "*Інновації інфраструктури транспортно-логістичних систем. Проблеми, досвід, перспективи*". Северодонецк, 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 1 University. P.41-42.
17. Прохорченко Г.О., Щербацька А.І., Ткачук М.М. Удосконалення методу визначення резервів часу у графіка руху поїздів на швидкісних та високошвидкісних магістралях. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2017.№.169(додаток).С.178-179.
18. Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010-2019 рр., затверджена постановою КМУ від 16.12.2009 № 1390. *Офіційний вісник України*. 2010. № 101 С. 179-189.

19. Плани імплементації деяких актів законодавства ЄС у сфері залізничного транспорту, схвалені розпорядженням КМУ від 26.11.2014 № 1148. *Офіційний вісник України*. 2014. № 97, С. 150-151.
20. Офіційний сайт ПАТ «Укрзалізниця». Київ, 2012. URL: [http://www.uz.gov.ua/files/file/Strategy\\_Presentation\\_fin1.pdf](http://www.uz.gov.ua/files/file/Strategy_Presentation_fin1.pdf)(дата звернення 15.01.2018).
21. Офіційний сайт ПАТ «Укрзалізниця». Київ, 2012. URL: [http://www.uz.gov.ua/cargo\\_transportation/general\\_information/indicators\\_of\\_transit](http://www.uz.gov.ua/cargo_transportation/general_information/indicators_of_transit)(дата звернення 17.01.2018).
22. Транспорт і зв'язок України-2013: статистичний збірник. Київ, Державна служба статистики України, 2014. 221 с.
23. Кушнір Л.В. Аналіз роботи транспорту України за основними показниками. *Науковий вісник Херсонського державного університету*. 2015. №12. С. 42-47.
24. Данько М.І., Бутько Т.В., Березань О.В., Кулешов В.М., Кулешов В.В., Калашникова Т.Ю., Малахова О.А., Лаврухін О.В., Сіконенко Г.М. Управління експлуатаційною роботою і якістю перевезень на залізничному транспорті: навчальний посібник. Харків: УкрДАЗТ; 2008. 174 с.
25. Боровикова М. С. Организация движения на железнодорожном транспорте: учебн.пособие. М. : Маршрут, 2003. 145 с.
26. Інструкція зі складання графіка руху поїздів на залізницях України, затверджена наказом Укрзалізниці від 05.04.2002 № 170-Ц. Чинна від 01.04.2006. Київ: Транспорт України, 2003. 146 с.
27. Каретников А.Д., Воробьев Н.А. График движения поездов. Москва: Транспорт, 1979. 301 с.
28. Бутько Т.В., Ломотько Д.В., Прохорченко А.В., Олійник К.О. Формування логістичної технології просування вантажопотоків за жорсткими нитками графіка руху поїздів. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2009. №78. С.71-75.

29. Проведення дослідного автоматизованого розрахунку нормативного графіка руху поїздів на залізничному напрямку(ДР№0113U001032):науково-дослідна робота .Харків:УкрДАЗТ, 2014. 108 с.
30. Про залізничний транспорт України: проект Закону України №7316 від 17.11.2017 р. Дата оновлення:17.11.2017. URL: [http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4\\_1?pf3511=62929](http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=62929) (дата звернення 30.11.2017).
31. Акулиничев В.М. Организация вагонопотоков. Москва : Транспорт, 1979. 223 с.
32. Тищенко С.А. Исходные данные и алгоритм оперативной подготовки элементов графика движения поездов. *Вестник ВНИИЖТ*. 2002. №2. С. 33–37.
33. Проведення дослідного автоматизованого розрахунку нормативного графіка руху поїздів на залізничному напрямку (ДР №0111U002236): науково-дослідна робота. Харків: УкрДУЗТ, 2014 р.
34. Удосконалення процедури побудови графіку руху поїздів на основі автоматизації (ДР №0115U006513): науково-дослідна робота. Харків: УкрДУЗТ, 2016 р.
35. Аналіз стану безпеки руху в структурі ПАТ «Укрзалізниця» у 2016 році. Публічне акціонерне товариство «Українська залізниця» Департамент безпеки руху. Київ. 2017. 123 с.
36. Szpigel B. Optimal train scheduling on a single track railway. *In Proceedings of IFORS Conference on Operational Research'72*.1973.№ 72(6). P. 343-352.
37. Higgins A., Kozan E., Ferreira L. Heuristic techniques for single line trainscheduling. *Journal of Heuristics*. 1997. №3(1). P.43–62.
38. Oliveira E., Smith B.M. A job-shop scheduling model for the single-track railway scheduling problem. *Technical Report University of Leeds*, URL: <http://www.opentrack.ch>, 2000(last accessed:16.04.2017).
39. Caprara A., Fischetti M., Toth P. Modeling and solving the train timetabling problem. *Operations Research*.2002.№ 50(5). P. 851–861.

40. Zhou X., Zhong M. Single-track train timetabling with guaranteed optimality: Branch-and-bound algorithms with enhanced lower bounds. *Transportation Research Part B* 41.2007. №41.P. 320–341.
41. Zhou X., Zhong M. Bi-criteria train scheduling for high-speed passenger railroad planning applications. *European Journal of Operational Research*. 2005. № 167 (3).P. 752–771.
42. Caprara A., Fischetti M., Toth P.. Modelling and solving the train timetabling problem. *Operations Research*. 2002. № 50(5). P. 851-861.
43. Hansen I. A., Pachl J. Railway Timetabling & Operations. Analysis - Modelling - Optimisation - Simulation - Performance Evaluation. Hamburg, 2014. 332 p.
44. Петров А.П. Составление графика движения поездов на ЭЦВМ. М.: Трансжелдориздат,1962. 122 с.
45. Дел Рио Б., Сафрис Л.В., Самарина Н.А. Разработка графика движения поездов при помощи вычислительной машины. Железнодорожный транспорт. 1959. №7.С. 17-23.
46. Дувалян С.В., Ададунова Е.В., Журавлёв М.М., Хандкаров Ю.С. Составление графика движения поездов на электронных цифровых вычислительных машинах. Москва:Транспорт, 1962. 135 с.
47. Ададунова Е.В., Хандакаров Ю.С. Составление парного параллельного графика движения поездов на однопутных линиях с применением ЭЦВМ «Кибернетика и автоматизация транспортных процессов». М.Трансжелдориздат, 1960. 105 с.
48. Рио Б.Дел. Автоматизация диспетчерского управления. Киев, Наукова думка,1965.79 с.
49. Джалилов Д.Ю. Составление и вычерчивание однопутных графиков движения поездов на ЭЦВМ : дис. . канд. техн. наук. Москва, 1973.150 с.
50. Завьялов Б.А. Эксплуатационные и технические основы системы участковый диспетчер. Труды ЦНИИ МПС, вып. 350 м., Транспорт 1967. 145 с.

51. Барткус А.Г. Решение задачи оптимального регулирования движения поездов методами линейного программирования. Труды ЛИИЖТа, вып. 223, Л., 1964.106 с.
52. Суворов В.К. Составление однопутного непараллельного графика движения поездов. *Вестник ЦНИИ МПС* .1966. №3. С. 65-78.
53. Козлов И.Т., Тихонов Г.Н. Составление однопутных непакетных графиков движения поездов на ЭВМ. *Вестник ЦНИИ МПС*. 1971. №7 С. 17-21.
54. Козлов И.Т., Тихонов Г.Н. Автоматизация составления однопутных графиков движения поездов. *Железнодорожный транспорт*. 1972. № 5, С. 25-27.
55. Тихонов Г.Н. Эвристический метод построения однопутных графиков движения поездов: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1974. 172 с.
56. Самарина Н.А. Составление двухпутного графика движения поездов на ЭВМ. М.: Изд-во «Транспорт», 1971. 124 с.
57. Самарина Н.А. Некоторые проблемы по совершенствованию алгоритмов и программ для составления графика движения поездов. *Труды МИИТ*. 1973, №. 449. С. 47-52.
58. Тишкин Е.М. Автоматизация разработки графика движения поездов. М.: Изд-во «Транспорт», 1974. 136 с.
59. Державец Г.И. Разработка и применение алгоритмических и программных средств автоматизации составления графиков движения поездов для однопутных линий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1984. 124 с.
60. Левин Д. Ю., Аунг Хейн Зо, Шмаль В. М. Что необходимо для выполнения графика. *Мир трансп.*2013. № 1. С. 110-119.
61. Гончаров М.М., Шпакович Р.А. Алгоритм побудови графіка руху поїздів *Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка"*. 2008. №.629. С. 146-152.
62. Нестеренко Г. І., Пасічний О. М. Автоматизована розробка і побудова графіків руху поїздів. *Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2012. №3.С. 87-93.

63. Шипулин А.В. дис. «Автоматизированное построение прогнозируемого графика движения поездов»: дис. ...канд.техн.наук. Екатеринбург, 2014. 156 с.
64. Ерофеев А.А., Ерофеева Е.А. Автоматизация диспетчерского управления поездной работой на Белорусской железной дороге. Наука и прогресс транспорту. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2012. №4.С. 67-73.
65. Баланов В.О. Анализ факторов, влияющих на обеспечение движения грузовых поездов по расписанию. *Транспортные системы и технологии перевозок*. 2015. № 10. С. 5-9.
66. Жарков М.Л., Парсюрова П.А., Казаков А.Л. Моделирование работы станций и участков железнодорожной сети на основе изучения отклонений от графика движения. *Вестник Иркутского государственного университета*. 2014. №6(89). С. 23-31.
67. Büker Thorsten, Seybold Bernhard. Stochastic modelling of delay propagation in large networks. *Journal of Rail Transport Planning & Management*.2012. Volume 2. P. 34-50.
68. Yan Fei, Goverde Rob M.P. Stability and Robustness Analysis of Acyclic Timetable. 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis. RailTokyo2015, Tokyo. 2015. P.391-350.
69. Kliwer N., Suhl L. A note on the online nature of the railway delay management problem. *Networks*.2011. Volume 57(1). P. 28-37.
70. Schwanhäusser W. Die Besessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn PhD thesis. Veröffentlichungen verkehrswissenschaftl. Institut RWTH Aachen, 20,1974. 56 p.
71. Hansen I. A., Allan J., Brebbia C. A., Hill, R. J. Increase of capacity through optimised timetabling. *Computers in Railways*. 2004. P. 529-538.
72. Kecman, P., Corman, F., Meng, L. Train delay evolution as a stochastic process. Proceedings of the 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis: RailTokyo2015, Tokyo.2015. P.190-195.

73. Yuan J., Goverde R. M. P., Hansen, I. A. Evaluating stochastic train process time distribution models on the basis of empirical detection data. *WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering*. 2011. №40. P. 95-104.
74. Schwanhäüßer W. Leistungsfähigkeit und Kapazität, in: DVWG (Hrsg.): Schriftenreihe der Deutschen Verkehrswissenschaftlichen Gesellschaft e.V. DVWG Reihe B: Seminar Bd.1994. P. 3 -17.
75. Vromans M.J.C.M. Reliability of Railway Systems, PhD thesis. Erasmus University Rotterdam, 2005.258 p.
76. Sipilä Hans. Simulation of rail traffic – Methods for timetable construction, delay modeling and infrastructure evaluation. Doctoral Thesis in Infrastructure, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2015. 98 p.
77. Kettner M., Sewcyk B., Eickmann C. Integrating Microscopic and Macroscopic Models for Railway Network Evaluation. In Proceedings of European Transport Conference. Strasbourg, France, 2003. 11p.
78. Goverde Rob M.P. A delay propagation algorithm for large-scale railway traffic networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2010.№ 18(3). P. 269-287.
79. Nash A., Huerlimann D. Railroad simulation using OpenTrack. Computers in Railways IX. 2004. P. 45-54.
80. SMA and Partner. Viriato – Software for railways. SMA Viriato Brochure, Zurich, Switzerland. 2012. 34p.
81. Umiliacchi S. Improving railway operations through the integration of macroscopic and microscopic modelling with optimisation. Thesis (Ph.D.) The University of Birmingham, UK, Birmingham, 2016. 128 p.
82. Farkas M., Héray T., Rózsa G., Kóczy T. L. Delay Propagation in a Real Life Railway Network Controlled by a Fuzzy Logic Rule Base. Magyar Kutatók 10. Nemzetközi Szimpóziuma 10th International Symposium of Hungarian Researchers on Computational Intelligence and Informatics, 2009. 423-433.

83. Carlos F. D., Jorge A. L. Solving Bottlenecks: A Numerical Method that Converges in Flows. Institute of Transportation Studies and Department of Civil and Environmental Engineering University of California, 2003. 56 p.
84. Long J. C., Gao Z. Y., Orenstein P., Ren H. L. Control strategies for dispersing incident-based traffic jams in two-way grid networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2011. №13(2).P. 469–481.
85. Wang W. H., Zhang W., Guo H. W., Bubb H., Ikeuchi K. A behavioural car-following safety model for microscopic simulation of traffic flow with various driving characteristics. *Transportation Research C*. 2011.№19(6). P. 1202–1214.
86. Xiaoxu Dai, Minghua Hu, Wen Tian, Daoyi Xie, Bin Hu. Application of Epidemiology Model on Complex Networks in Propagation Dynamics of Airspace Congestion. *Plos one*  
 URL:<http://www.journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0157945#reference> (Last accessed: 12.10.2017).
87. Cook S.A. The complexity of theorem-proving procedures Proc. 3rd. Annual ACM Symp. Theory of Computing. New York, 1971.208 p.
88. Karp R.M., Miller R.E., Thather J.W. Reducibility among combinatorial problems. *Complexity of Computer Computations*, Plenum press, New York, 1972. 123 p.
89. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. Москва, 1982. 416 с.
90. Рейнгольд Э., Нивергельт Ю., Део Н. Комбинаторные алгоритмы: теория и практика. Москва, 1980.476 с.
91. Luh, P.B., Chen, D., Thakur, L.S. An effective approach for job-shop scheduling with uncertain processing requirements. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1999. №15 (2). P. 328–339.
92. Dinh Nguyen PHAM. Complex Job Shop Scheduling: Formulations, Algorithms and a Healthcare Application. Thesis presented to the Faculty of Economics and Social Sciences at the University of Fribourg.Switzerland. 2008. 162 p.



93. D'Ariano D., Pacciarelli D., Pranzo M. A branch and bound algorithm for scheduling trains in a railway network. *European Journal of Operational Research*. 2007.№ 183. P. 643–657.
94. Cho Y., Sahni S. Preemptive scheduling of independent jobs with release and due times on open, flow and job shops. *European Journal of Operational Research*. 1981. №29. P. 511–522.
95. Du J., Leung J. Y.-T. Minimizing mean flow time in two-machine open shops and flow shops. *Journal of Algorithms*. 1993.№14. P. 22-44.
96. Gonzalez T., Sahni S. Open shop scheduling to minimize finish time. *Journal of the ACM*.1976.№23. P. 665–679.
97. Gonzalez T., Sahni S. Flowshop and jobshop schedules: complexity and approximation. *European Journal of Operational Research*. 1978. №26(1).P. 36–52.
98. Про особливості утворення публічного акціонерного товариства залізничного транспорту: Закон України від 23.02.2012 р. № 4442-IV. Дата оновлення:06.01.2018. URL: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/4442-17> (дата звернення 17.01.2018).
99. Конвей Р.В., Максвелл В.Л., Миллер Л.В. Теория расписаний. Москва: Транспорт, 1975. 360 с.
100. Левин В.И. Структурно-логические методы в теории расписаний: монография.-Пенза:Изд-во Пенз. Гос.технол.акад.,2006 г. 124 с.
101. Самарина Н.А. Составление двухпутного графика движения поездов на ЭВМ. Москва:Транспорт, 1971. 124 с.
102. Інструкція з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць України: затв. наказом Укрзалізниці від 14.03.2001 р. № 143/Ц. / уклад.: О. Ф. Вергун, Н. В. Липовець, В. М. Боголій. К.: Транспорт України, 2002. 376 с
103. Абрамов А.А. Управление эксплуатационной работой:Ч. II. График движения поездов и пропускная способность :учеб. пос./ Москва:РГОТУПС, 2002. 171 с.

104. Кудрявцев В.А. Управление движением на железнодорожном транспорте: учебное пособие для вузов ж.-д. Москва: Маршрут, 2003. 200 с.
105. Правила технічної експлуатації залізниць України: затв. наказом М-ва транспорту України від від 20.12.1996 р. N 411. *Офіційний вісник України*. 1997 р., № 8, том 2, стор. 212.
106. Рутковская Д., Пилинський М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. Москва: Горячая линия-Телеком, 2006. 383 с.
107. Черноморов Г.А. Теория принятия решений: учебное пособие / Юж.-Рос. Гос.техн.ун-т. Новочеркасск: Ред.журн. «Изв.вузов. Электромеханика», 2002 г. 276 с.
108. Karaboga D., Basturk B. A Powerful and Efficient Algorithm for Numerical Function Optimization: Artificial Bee Colony(ABC). *Journal of Global Optimization*. 2007. № 39. P. 459-471.
109. Karaboga D., Akay B. A survey: Algorithms simulating bee swarm intelligence. *Artificial Intelligence Review*. 2009. №31. P.61–85.
110. Karaboga D., Gorkemli B., Ozturk C., and Karaboga N. A comprehensive survey: Artificial bee colony (ABC) algorithm and applications. *Artificial Intelligence Review*. 2014. № 42(1). P. 21–57.
111. Kiran M., Findik O. A directed artificial bee colony algorithm. *Applied Soft Computing*. 2015. № 26. P. 454-462.
112. Iwan-liXiang, Mei-qingAn. An efficient and robust artificial bee colony algorithm for numerical optimization. *Computers & Operations Research*. 2013. № 40(5). P. 1256-1265.
113. Seyyed Reza Khaze, Isa Maleki, Sohrab Hojjatkah, Ali Bagherinia. Evaluation the efficiency of Artificial bee colony and the firefly algorithm in solving the continuous optimization problem. *International Journal on Computational Sciences & Applications (IJCSA)*. 2013. №3(4). P.23-35 DOI:10.5121/ijcsa.2013.
114. Курейчик В.М., Кажаров А.А. Использование пчелиных алгоритмов для решения комбинаторных задач. «Штучний інтелект». 2010. №3. С.583-589

115. Landex A. Network effects in railway systems. *Association for European Transport and contributors*. 2007. №3. P. 16-20.
116. Nyström B. Aspects of Improving Punctuality From Data to Decision in Railway Maintenance: Doctoral Thesis. Lulea University of Technology, 2008. P. 276.
117. UIC leaflet 406 R. Capacity. UIC International Union of Railways, France, 2e édition. 2013. Version traduite. List of recent publications P. 60 .
118. Правила тягових розрахунків для поїзної роботи: Наказ Укрзалізниці №206-ЦЗ від 22.12.2010 р. Київ: Транспорт, 2011. 25 с.
119. Abril, M., Barber, L. Ingolotti, M., Salido, A., Tormos, P., Lova, A. An assessment of railway capacity. *Transportation Research*. 2008 №44. P. 774-806.
120. Jianxin Yuan. Stochastic Modelling of Train Delays and Delay Propagation in Stations. Eburon Uitgeverij B.V., 2006. 142 p.
121. Chao Wen, Zhongcan Li, Javad Lessan, Liping Fu, Ping Huang, Chaozhe Jiang. Statistical investigation on train primary delay based on real records: evidence from Wuhan–Guangzhou HSR. *International Journal of Rail Transportation*. 2017. №5(3). P. 170-189.
122. Mattsson, L.G. Railway Capacity and Train Delay Relationships, Critical Infrastructure: Reliability and Vulnerability. Springer: Berlin Heidelberg, 2007. 158 p.
123. Rail Transportation of Coal to Power Plants: Reliability Issues. Washington D.C.: Congressional Research Service, 2007. 82 p.
124. Schachtebeck M. Delay management in public transportation: capacities, robustness, and integration: PhD thesis. Universität Göttingen, 2010. 240 p.
125. Landex A. Network effects in railway systems. *Association for European Transport and contributors*. 2007. №12. P. 16-20.
126. Kozačenko D.N., Berezovij N.Y., Balanov V.O., Žuravel V.V. Rezervi vremeny pry orhanyzacyu dvyženyja hruzovix poezdov po raspysanyju. *Nauka ta prohres transportu*. 2015. № 2(56). P. 105-115.
127. Формування комплексу універсальних моделей, реалізація яких забезпечує раціональну організацію вантажопотоків на залізничній транспортній

- мережі (ДР №0111U002236): науково-дослідна робота. Харків: УкрДУЗТ, 2014 р.
128. Методи формування інтелектуальних транспортних систем(ДР №0113U001032): науково-дослідна робота. Харків: УкрДУЗТ, 2015 р.
129. Кириченко Г. І. Концепція інтелектуальної транспортної системи управління процесами доставки вантажу. *Залізничний транспорт України*. 2013. №1. С. 37–40.
130. Формування комплексу універсальних моделей, реалізація яких забезпечує раціональну організацію вантажопотоків на залізничній транспортній мережі(ДР №0111U002236): науково-дослідна робота. Харків: УкрДАЗТ, 2011 р.
131. Автоматизована система для вибору ресурсозберігаючої технології вантажного терміналу із системою підтримки рішення: пат.87928 Україна. МПК (2014.01),G06F7/00,G06F15/00,G06G7/00.№ 2013 10748; заявл. 06.09.2013; опубл. 5.02.2014, Бюл.№4. 7 с.
132. Edwards J.S. Expert Systems in Management and Administration — Are they really different from Decision Support Systems? *European Journal of Operational Research*. 1992.№61.P. 114-121.
133. Druzdzel M. J., Flynn R. R. Decision Support Systems. *Encyclopedia of Library and Information Science*. Marcel Dekker, 1999. 193 p.
134. Годяев А. И. Методологические основы и принципы построения систем поддержки принятия решений в задачах обеспечения безопасности управления движением на железнодорожном транспорте: дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.08. Москва, 2006. 436 с.
135. Терелянский П. В. Системы поддержки принятия решений. Опыт проектирования: монография. Волгоград: ВолгГТУ, 2009. 127 с.
136. Информационные технологии на железнодорожном транспорте: учебн.для вузов ж.-д. трансп./под ред. Э.К. Лецкого, Э.С. Поддавашкина, В.В. Яковлева. –М.: УМК МПС России., 2000. 450 с.

137. Абрамов А.А., Биленко Г.М. Современные системы автоматизированного управления перевозками (функциональные возможности АРМ): Уч. пос.М.: РГОТУПС, 2002. 136 с.
138. Косолапов А.А., И.В. Жуковицкий Резервы архитектуры автоматизированной системы управления грузовыми перевозками Украинских железных дорог. *Залізничний транспорт України*. 2013. №1(98). С.54-49.
139. Ивченко Ю.М., Ивченко В.Г., Гондар А.Н. Интеграция сетевого оборудования АСК ВП УЗ и АСК ПП УЗ, подключение его к ЕМПД. *Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*. 2009. №29. С. 143-146.
140. Економіка залізничного транспорту: підручник / за ред. Ю. Ф. Кулаєва, Ю. С. Бараша, М. В. Гненного. Дніпропетровськ: Дніпропетровський національний ун-т залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, 2014. 480 с.
141. Белов И.В., Галабурда В.Г., Данилин В.Ф. Экономика железнодорожного транспорта: учебник для вузов/ под ред.Белова И.В. М.: Транспорт, 1989. 121 с.
142. Економіка транспорту: Навчальний посібник/ за заг. ред. М.В.Макаренка. К.: ДЕДУТ, 2014. 364с.