

Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна  
БОБРОВСЬКИЙ ВОЛОДИМИР ІЛЛІЧ

УДК 656.212

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ  
та ТЕХНОЛОГІЇ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТАНЦІЙ  
05.22.20- Експлуатація та ремонт засобів транспорту  
Автореферат  
дисертації на здобуття ученого ступеня  
доктора технічних наук

Дніпропетровськ 2002

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрах "Станції і вузли" та "Електронні обчислювальні машини"  
Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.  
Лазаряна Міністерства транспорту України.

**Науковий консультант:**

доктор технічних наук, професор **Шафіт Євген Миронович**,  
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка  
В. Лазаряна, професор кафедри ЕОМ.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор **Нагорний Євген Васильович**,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,  
завідувач кафедри "Транспортні технології";

доктор технічних наук, професор **Негрей Віктор Якович**,  
Білоруський державний університет транспорту, перший проректор;

доктор технічних наук, професор **Бутько Тетяна Василівна**,  
Українська державна академія залізничного транспорту,  
завідуюча кафедрою "Управління експлуатаційною роботою і міжнародними  
перевезеннями".

**Провідна установа**

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, кафедра "Транспортні  
технології", Міністерство освіти і науки України, м. Луганськ.

Захист відбудеться 24 січня 2003 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.02 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту України за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Акад. Лазаряна, 2, зал засідань, к. 314.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту України.

Автореферат розісланий 20 грудня 2002 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,  
доктор технічних наук

Жуковицький І. В.

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Залізничні станції є одним з головних елементів транспортної інфраструктури і відіграють важливу роль у забезпеченні потреб держави і населення в перевезеннях.

У сучасних умовах, що характеризуються нестабільністю обсягів перевезень, змінами структури і напрямку транспортних потоків, необхідністю скорочення експлуатаційних витрат залізниць, основною метою удосконалення станцій є приведення їх конструкції і технології у відповідність з обсягами роботи. Для досягнення зазначеної мети у програмі реструктуризації залізниць України намічений ряд заходів: концентрація сортувальної роботи на сітьових станціях з механізованими гірками, зосередження маневрової роботи з підбірки груп місцевих вагонів по вантажних фронтах і вантажах на несітьових сортувальних і дільничних станціях, закриття окремих парків і колій на станціях, скорочення кількості бригад ПТО і маневрових локомотивів, або переведення їх на однозмінний режим роботи та ін. Раціональний вибір комплексу можливих заходів для кожної станції являє собою досить складну задачу, яку не можна вирішувати методом спроб і помилок. Будь-які зміни конструкції і технології роботи станцій позначаються на їх техніко-експлуатаційних і економічних показниках. У зв'язку з цим при плануванні реконструктивних заходів необхідно попередньо кількісно оцінити їх вартість, а також очікувані зміни пропускної і перероблювальної спроможності станції, часу перебування вагонів на станції і витрат, пов'язаних з їх переробкою. При цьому необхідно врахувати взаємодію окремих підсистем станції, тому що її порушення веде до різкого збільшення міжопераційних простоїв і заповнення станційних колій. Ефективним засобом вирішення задачі пошуку раціональних шляхів удосконалення конструкції, технічного оснащення і технології роботи залізничних станцій є математичні моделі, методи й алгоритми аналізу і синтезу станцій у поєднанні з використанням сучасних засобів обчислювальної техніки та інформаційних технологій.

Роботи зі створення і дослідження на ЕОМ моделей залізничних станцій і вузлів ведуться з початку 60-х років. За цей час працями багатьох учених створені методологія і моделі станцій різного класу і призначення, розроблені програми для розрахунку планів колійного розвитку. Однак, існуючі моделі, як правило, зорієнтовані на вирішення розрізнених задач або аналізу, або синтезу, оскільки побудовані на різній методологічній основі. Крім того, створені моделі повинні

постійно удосконалюватися по мірі розвитку наукових основ експлуатації залізниць, створення нових математичних методів і засобів обчислювальної техніки. Таким чином, розвиток теорії удосконалення конструкції і технології залізничних станцій на основі математичного моделювання з метою підвищення ефективності їх експлуатації є актуальною науковою проблемою і має велике значення для транспорту України.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження,

проведені в рамках дисертації, пов'язані з програмами і темами НДР, що виконані Дніпропетровським національним університетом залізничного транспорту:

- Концепція і Програма реструктуризації на залізничному транспорті України.

- План робіт зі створення автоматизованої системи керування розформуванням составів на гірках у рамках теми 1.4 "Розробка комплексної системи автоматичних пристроїв для розформування составів на гірках сортувальних станцій" - накази МШС №38Ц від 22.12.1981р. і №2Ц від 7.01.1984р. (номер державної реєстрації 78043237).

- Тема "Система автоматизованого контролю виконання технологічного процесу і формування повідомлень в АСУСС і АРМи оперативного персоналу сортувальної станції (СКАТ СС)" Робота 92.67.98.98-№123/98-661.98-ЦТех, 92.67.99.00-№55/99-714.99-ЦТех, виконана за договором з Державною адміністрацією залізничного транспорту України (номер державної реєстрації 01000004132).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є підвищення ефективності експлуатації залізничних станцій за рахунок поліпшення якості управлінських і проектних рішень, що приймаються для удосконалення їх конструкції і технології роботи. Засобом для досягнення зазначеної мети є математичне моделювання станцій, для якого необхідна система взаємозв'язаних структурних і функціональних моделей, побудована на єдиній методологічній основі з використанням системного підходу. У зв'язку з цим в дисертації поставлені і вирішені наступні задачі:

1. Створення системи геометричних моделей станцій для забезпечення графічного введення в ЕОМ їх немасштабних схем, автоматизації параметричного синтезу планів колійного розвитку, побудови креслень і підготовки даних для функціонального моделювання.
2. Розробка теоретичних основ і методики побудови ергатичних функціональних моделей станцій, в яких людина в процесі моделювання виконує функції оперативно-диспетчерського персоналу.
3. Удосконалення теорії моделювання руху об'єктів на станціях і підходах до них та розробка інтегрованої імітаційної моделі руху потоків поїздів на лініях розв'язок залізничних вузлів і їх пропуску через пункти пересічення і злиття ліній.
4. Узагальнення досвіду моделювання сортувального процесу, удосконалення моделей скочування відчепів і розпуску составів на основі неперервної апроксимації профілю гірки; розробка методу оптимізації режимів гальмування відчепів состава.
5. Аналіз і формалізація методів формування багатогрупних составів, побудова імітаційної моделі процесу формування, розробка методу його оптимізації, пошук залежностей часу формування составів від їх параметрів, а також від характеристик пристроїв, що використовуються для формування.

*Об'єктом дослідження* є процес функціонування залізничних станцій.

*Предмет дослідження* - взаємозв'язки техніко-технологічних параметрів залізничних станцій з показниками їх призначення і якості, які використовуються для прийняття рішень з метою удосконалення конструкції і технології роботи станцій.

*Методи дослідження.* Теорія графів, методи аналітичної та обчислювальної геометрії використовувалися для побудови, аналізу і перетворення геометричних моделей колійного розвитку станцій.

Методи математичного аналізу і числові методи вирішення диференціальних рівнянь використані для моделювання процесів руху поїздів на підходах до станцій і скочування відчепів на гірках.

Методи сплайн-апроксимації функцій використані для моделювання поздовжнього профілю колій на перегонах і на сортувальних гірках.

Теорія скінченних автоматів і бульові функції використані для моделювання роботи систем регулювання руху поїздів на станціях і перегонах.

Методи теорії ймовірностей, математичної статистики і статистичного моделювання використовувалися для формування випадкових потоків составів, відчепів, груп вагонів.

Методи сіткового планування використані для формалізації технологічних процесів в окремих підсистемах залізничних станцій, а також для аналізу якості їх функціонування.

Методи планування експериментів, групового обліку аргументів (МГУА) і регресійного аналізу використовувалися для побудови статистичних моделей, а також для дослідження та оцінки ефективності імітаційних моделей скочування відчепів з гірки.

Методи лінійного, нелінійного і динамічного програмування використовувалися для дослідження та оптимізації режимів гальмування відчепів.

Методи комбінаторної математики використовувалися для дослідження процесів формування багатогрупних составів.

Дослідження усіх функціональних моделей у дисертації здійснювалося з використанням методу імітаційного моделювання.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному:

1. Уперше розроблені теоретичні основи геометричного моделювання залізничних станцій, що дозволило автоматизувати параметричний синтез плану колійного розвитку, перетворення немасштабного графічного зображення схеми станції в масштабний план, побудову креслень і підготовку даних для аналізу станції методом імітаційного моделювання.
2. Уперше запропонована концепція і розроблені теоретичні основи ергатичних функціональних моделей залізничних станцій, у яких людина бере безпосередню участь у процесі моделювання, виконуючи функції оперативно-диспетчерського персоналу; розроблені ергатичні моделі окремих підсистем станцій. Ергатичні моделі, на відміну від існуючих, адекватно моделюють діючі системи керування станціями, що дозволяє одержати об'єктивні кількісну і якісну оцінки технічних засобів і технології роботи станцій, а також визначити напрямки їх подальшого удосконалення. Дані моделі також можуть бути основою для створення тренажерів оперативно-диспетчерського персоналу.
3. Уперше розроблена методика сплайн-апроксимації поздовжнього профілю сортувальної гірки, яка дозволила практично виключити помилки апроксимації та удосконалити моделі скочування відчепів і розпуску составів, у результаті чого була забезпечена синхронізація паралельних процесів насунання состава, скочування відчепів і роботи всіх гіркових пристроїв, а також підвищена точність і швидкість моделювання.
4. Уперше встановлені закономірності розподілу енергетичної висоти, що погашається, в області припустимих режимів гальмування відчепів на гірках. Доведено, що оптимальні режими гальмування розташовуються на межах цієї області. Вирішено задачу оптимізації режимів гальмування відчепів состава в нелінійній постановці, що дозволило поліпшити якість інтервального регулювання швидкості їх

скочування.

5. Запропонований новий (розподільний) метод формування багатогрупних составів, удосконала математична модель процесу формування, уперше розроблена методика його оптимізації, що дозволяє автоматизувати керування цим процесом та істотно скоротити час формування. Отримано залежності часу формування від параметрів состава а також від характеристик пристроїв, що використовуються для формування.

**Практичне значення отриманих результатів.** Наукові положення, висновки і рекомендації, а також розроблені методи, моделі й алгоритми можуть бути використані при створенні автоматизованої системи аналізу і синтезу залізничних станцій, при розробці автоматизованих систем керування станціями або окремими технологічними комплексами, при побудові тренажерних систем оперативно-диспетчерського персоналу станцій, а також для розробки технологічних процесів і технічно-розпорядчих актів, для паспортизації станцій. В даний час отримані результати використані:

1. При розробці автоматизованої системи керування розформуванням составів на гірках сортувальних станцій (АСУ РСГ) на станції Ясинувата Донецької залізниці.
2. При розробці тренажерів гіркових операторів станцій Нижньодніпровськ-Вузол та Запоріжжя-Ліве Придніпровської залізниці.
3. При розробці програмного комплексу АРМ диспетчера вантажної станції.
4. При розробці проекту системи автоматизованого контролю виконання технологічного процесу і формування повідомлень в АСУСС і АРМ оперативного персоналу сортувальної станції (СКАТ СС).

**Особистий внесок автора.** Усі наукові положення, розробки і результати досліджень, що виносяться на захист, отримані особисто автором. У наукових працях, що опубліковані в співавторстві, особистий внесок автора наступний.

У [1] автором написана друга глава. У [9] запропонована концепція використання інформаційних технологій у проектуванні станцій і вузлів, викладені принципи і методика побудови геометричних і функціональних моделей станцій. У [10] розроблені імітаційні моделі руху поїздів і функціонування сортувальної станції. У [12] сформульована постановка задачі і розроблена методика моделювання технології роботи станцій. У [14] розроблена імітаційна модель заповнення сортувальних колій. У [15] запропонована методика статистичного моделювання параметрів відчепів і умов їх скочування з гірки, отримані залежності, що необхідні для використання цієї методики. У [17] запропоновано ітераційний метод і розроблено алгоритм розрахунку додаткових кутів у гіркових горловинах сортувальних парків. У [19] розроблена методика оптимізації інтервалів між відчепами на розділових стрілках і статистичні моделі для керування інтервальними гальмівними позиціями. У [20] розроблена модель регульованого скочування відчепів із сортувальної гірки в умовах автоматизації, а також алгоритм визначення режимів їх гальмування. У [21] запропонована методика ідентифікації процесу скочування відчепів за допомогою методу групового обліку аргументів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні матеріали і результати дисертації доповідалися й одержали схвалення: на 17-й, 20-й і 23-й загальносвітських науково-технічних конференціях (Москва, МІТ, 1980, 1983, 1985рр.); на міжнародній науковій конференції "Інформаційні технології на транспорті" (Київ, 1998р.); на 9-й, 11-й, 12-й, 13-й, 14-й і 15-й міжнародних школах-семінарах "Перспективні системи керування на залізничному, промисловому і міському транспорті" (м. Алушта, 1996, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002 рр.); на міждержавних науково-методичних конференціях "Комп'ютерне моделювання" (Дніпродзержинськ, 1999, 2000 рр.); на об'єднаному

науковому семінарі кафедр станцій і вузлів та електронних обчислювальних машин Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (1999р.).

**Публікації** Основний зміст дисертації опублікований у 38 наукових працях, у тому числі у одній монографії, у 13 статтях в наукових журналах, у 12 статтях в збірниках наукових праць і у 12 статтях в матеріалах і тезах конференцій.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертація складається з вступу, семи розділів, висновків і 9 додатків. Повний обсяг роботи - 534 сторінки; з них основний текст на 295 сторінках, 74 рисунка і 43 таблиці на 73 сторінках, список використаних джерел з 254 найменувань на 24 сторінках, додатки на 142 сторінках.

#### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність проблеми, сформульовані мета і задачі досліджень, відображена наукова новизна результатів, їх практичне значення.

Приводяться відомості про апробацію і публікацію результатів дисертації.

У **першому розділі** виконаний аналіз основних етапів розвитку і сучасного стану методів моделювання, що використовуються для пошуку шляхів удосконалення конструкції і технології роботи залізничних станцій.

Однією з основних наукових проблем в галузі експлуатації залізничних станцій є підвищення їх пропускної і перероблювальної спроможності. Для вирішення зазначеної проблеми широко використовувалися математичні моделі і методи, роль яких зростала в міру поширення засобів обчислювальної техніки. Великий внесок у теорію удосконалення залізничних станцій з використанням методів моделювання внесли вчені Акулінічев В.М., Архангельський Є.В., Бутько Т.В., Буянов В.О., Бикадоров О.В., Гриценко В.І., Грунтов П.С., Єфименко Ю.І., Жуковицький І.В., Іванченко В.М., Козлов П.О., Козлов І.Т., Корнаков А.М., Мірошніченко В.М., Муха Ю.О., Нагорний Є.В., Негрей В.Я., Образцов В.М., Павлов В.Є., Правдін М.В., Персианов В.О., Скалов К.Ю., Сотніков Є.О., Сотніков І.Б., Таль К.К., Тішкін Є.М., Усков М.С., Федотов М.І., Шабалін Н.Н., Шафіт Є.М., Ющенко М.Р. та ін.

У сучасних умовах роботи залізничного транспорту України задача удосконалення конструкції і технології роботи станцій є, як і раніше, актуальною, незважаючи на зміну її цілей і критеріїв. У теоретичному аспекті дану задачу можна розглядати як задачу синтезу системи з заданими якостями. Її вирішення може бути отримане шляхом послідовного поліпшення вихідного варіанта станції на основі аналізу його математичної моделі, у результаті якого одержують кількісну оцінку техніко-технологічних параметрів станції. Зазначена оцінка використовується для прийняття рішення про завершення чи продовження пошуку; в останньому випадку виконується параметричний синтез чергового варіанта, після чого знову здійснюється його аналіз.

Для вирішення задач аналізу і синтезу станцій необхідна система структурно-параметричних і функціональних моделей. Структурно-параметричні моделі відображають конструкцію станцій і використовуються для їх синтезу; вони також повинні служити інформаційною базою для функціональних моделей.

Функціональні моделі станцій відображають відповідні технологічні процеси і використовуються для вирішення задач аналізу; вони дозволяють одержати кількісну оцінку ефективності станцій, яка необхідна для пошуку шляхів удосконалення їх конструкції і технології роботи.

Зазначена система математичних моделей може бути покладена в основу автоматизованої системи підтримки прийняття рішень, що повинна використовуватися працівниками станцій для вибору заходів, спрямованих на підвищення ефективності їх експлуатації. Створення подібних систем розглядається в Програмі реструктуризації,

як один з основних напрямків інформатизації залізничного транспорту. Як показав аналіз можливих типів структурних моделей, для опису конструкції колійного розвитку станцій доцільно використовувати геометричні моделі. Зазначені моделі досить широко використовуються для автоматизації розрахунків з'єднань колій. До цього часу створено значну кількість програмних засобів для розрахунків різноманітних елементів колійного розвитку станцій. Однак, як показав аналіз, вони мають ряд недоліків, які перешкоджають їх використанню для вирішення поставленої задачі. Головним недоліком є складність підготовчої роботи, яка вимагає ручного кодування схем станцій і введення в ЕОМ інформації в цифровій формі. Крім того, при розрахунках, як правило, потрібне попереднє розбивання станцій на окремі типові елементи. Такі програмні засоби вимагають високої кваліфікації користувачів в області проектування станцій, що утруднює їх широке використання технологіями станцій. Слід зазначити також, що існуючі геометричні моделі, які використовуються для розрахунку планів колійного розвитку, не можуть одночасно використовуватися і для функціонального моделювання станцій. Виходячи з цього, сформульована **перша** задача дослідження: *побудувати систему геометричних моделей станцій для забезпечення графічного введення в ЕОМ їх немасштабних схем, автоматизації параметричного синтезу планів колійного розвитку, побудови креслень і підготовки даних для функціонального моделювання.*

Проблема створення функціональних моделей станцій ускладнюється великою різноманітністю їх типів і особливостями технологічного процесу. У цих умовах доцільна уніфікація моделей окремих станційних підсистем та їх наступне використання для побудови моделей конкретних станцій. Відповідно до теорії взаємодії в технології станцій, для аналізу роботи станцій більшості типів досить створити функціональні моделі чотирьох основних підсистем: підходів до станцій, приймальновідправних парків, сортувальних гірок і районів формування составів. У зв'язку з цим в дисертації був виконаний аналіз робіт вітчизняних і закордонних учених, присвячених проблемам функціонального моделювання станцій по чотирьох зазначених напрямках.

Одним з основних недоліків існуючих моделей станцій є те, що в них вибір черговості виконання операцій з поїздами, локомотивами, складами та ін. здійснюється за допомогою деякого алгоритму, побудованого на основі постійного набору правил. У той же час, ефективність експлуатації станцій визначається не тільки її конструкцією і технологією, але і діючою системою керування, основною ланкою якої є диспетчер. З огляду на те, що в даний час не існує методів адекватного моделювання діяльності диспетчера, у дисертації була поставлена **друга** задача дослідження: *розробити теоретичні основи і методику побудови ергатичних функціональних моделей станцій, у яких людина бере безпосередню участь у моделюванні, виконуючи функції оперативно-диспетчерського персоналу.*

В існуючих функціональних моделях час заняття кожного елемента станції, як правило, є постійним і повинен бути заданим при підготовці до моделювання. Такий підхід істотно збільшує трудомісткість підготовки до моделювання, ускладнює саме моделювання, знижує його точність і, крім того, він не дозволяє визначити витрати, пов'язані з пересуванням рухомого складу.

Для ліквідації зазначених недоліків необхідне моделювання переміщення рухомого складу по станції. Особливо необхідна модель руху поїздів на підходах до станцій (у вузлах), де розташовані пункти пересічення і злиття ліній. Подібна модель, що побудована на основі диференціальних рівнянь руху поїздів, дозволить визначати пропускну здатність пунктів пересічень, а також витрати, що зв'язані як із пробігами

поїздів, так і з їх можливими затримками у цих пунктах. Беручи до уваги, відсутність подібних інтегрованих моделей, була сформульована **третя** задача досліджень: *удосконалити теорію моделювання руху об'єктів на станціях і підходах до них; розробити інтегровану імітаційну модель руху потоків поїздів на лініях розв'язок залізничних вузлів і їх пропуску через пункти пересічення і злиття ліній.*

Одним із найважливіших елементів сортувальних станцій є гірки, якість роботи яких визначає ефективність експлуатації станцій в цілому. Теорія моделювання сортувального процесу розроблена в даний час досить глибоко. Працями багатьох вітчизняних і закордонних учених докладно досліджений процес скочування відчепів з гірки, створені його математичні моделі. Одним із недоліків існуючих моделей є використання кусково-лінійної апроксимації профілю гірки. Це не дозволяє використовувати диференціальні рівняння руху відчепів, у яких незалежною змінною є час, і тим самим утруднює моделювання паралельних процесів насування состава і скочування відчепів та їх синхронізацію з роботою всіх гіркових пристроїв.

Використання ж для апроксимації профілю поліномів та інших неперервних кривих не забезпечує необхідної точності. Не вирішеною залишається проблема оптимізації режимів гальмування відчепів состава. У зв'язку з цим була сформульована **четверта** задача дослідження: *узагальнити досвід моделювання сортувального процесу, удосконалити моделі скочування відчепів і розпуску составів на основі неперервної апроксимації профілю гірки; розробити метод оптимізації режимів гальмування відчепів состава.*

Четвертим елементом системи функціональних моделей станцій є модель процесу формування составів. Це найбільш складний і трудомісткий технологічний процес на станціях, особливо при формуванні багатогрупних составів. Його складність обумовлена необхідністю багаторазового сортування вагонів, що виникає в умовах обмеженої кількості сортувальних колій при великій кількості груп у составі. При цьому, як правило, існує дуже велика кількість можливих варіантів сортування, серед яких необхідно знайти оптимальний, що забезпечує мінімальний час формування. Як показав аналіз, в багатьох наукових працях пропонуються різні методи формування багатогрупних составів. У той же час теоретичним дослідженням процесу формування, методиці його оптимізації приділяється недостатня увага. З огляду на перелічені обставини, була поставлена **п'ята** задача досліджень: *виконати аналіз і формалізацію методів формування багатогрупних составів, побудувати імітаційну модель процесу формування, розробити метод його оптимізації; встановити залежності часу формування составів від їх параметрів, а також від характеристик пристроїв, що використовуються для формування.*

В **другому розділі** виконані дослідження і побудова геометричних моделей, що використовуються на окремих етапах синтезу планів колійного розвитку станцій (вхідні, внутрішні, вихідні моделі), а також розроблені методи їх перетворення. В основу моделей покладене представлення схем станцій у вигляді орграфів, вершинам і дугам яких ставляться у відповідність необхідні параметри.

Вхідною моделлю станції є орієнтований граф  $G = \{e_1, e_1, \dots, e_m\}$ , представлений списком дуг  $e_i = (v_{Li}, v_{Pi})$ , де  $v_{Li}$ ,  $v_{Pi}$  - відповідно, ліва і права вершини, інцидентні дузі  $e_i$ . Розроблена вхідна модель станції дозволила реалізувати графічне введення в ЕОМ немасштабної схеми, її автоматичний аналіз і перетворення у внутрішню модель. Графічне введення дозволяє істотно прискорити синтез планів станцій за рахунок ліквідації етапу ручного кодування схем і зменшення можливої кількості помилок. Для графічного введення використовується адаптований до даної задачі пакет AutoCAD.

Внутрішня модель включає канонічну модель станції і модель її горизонтальних колій і використовується для розрахунку плану колійного розвитку.

Канонічна модель відображає топологічну структуру станції і являє собою оргграф  $G = (V, E)$ , множина вершин якого  $V$  розділена на три підмножини: центри стрілочних переводів  $V^S$  (номери  $N^S \in \{1, 99\}$ ), вершини кутів повороту  $V^C$  (номери  $N^C \in \{201, 299\}$ ) і кінці колій  $V^W$  (номери  $N^W \in \{101, 199\}$ ), так що  $V = V^S \cup V^C \cup V^W$ . Кожна дуга оргграфа  $e=(v, u)$  відповідає ділянці колії від вершини  $v$  до  $u$ ; прийнято, що всі дуги орієнтовані зліва направо (рис. 1).

Для представлення канонічної моделі в ЕОМ використані списки інцидентності вершин  $\{u: \mathbb{V}u\}$ , що забезпечують необхідну компактність представлення. Кожній вершині графа поставлений у відповідність вектор параметрів, що характеризують даний елемент станції. Компоненти зазначених векторів визначаються типом відповідної вершини ( ${}^v\text{OV}^S: \mathbf{X}^S$ ,  ${}^v\text{OV}^C: \mathbf{X}^C$ ,  ${}^v\text{OV}^W: \mathbf{X}^W$ ). Дана модель дозволяє виконати автоматичний аналіз схеми, ідентифікацію її типових елементів і їх розрахунок за допомогою розроблених програмних модулів.

Горизонтальні колії станції представлені вершинами деревоподібного графа  $D=(W, H)$ , кожному ребру якого поставлене у відповідність окреме міжколійя. Для одержання дерева  $D$  на основі вхідної моделі станції необхідно побудувати неорієнтований зважений граф горизонтальних колій станції  $\bar{D} = (W, \bar{H})$ , в якому вершинам  $w_i$

відповідають колії, а ребрам  $h_j$  – відстані між ними. У графі  $\bar{D}$  за допомогою алгоритму Прима знаходиться найкоротший кістяк  $\bar{D}_0$ , на основі якого будується шукане дерево  $D$ , починаючи від опорної вершини (стрілки із заданою ординатою  $Y_0$ ), що є коренем дерева. Отримане дерево  $D$  визначає пари колій  $(w_i, w_j)$ , для яких потім в інтерактивному режимі задається необхідна ширина міжколійя  $g_{ij}$ . Модель горизонтальних колій використовується для визначення ординат  $Y$  і кутів нахилу  $q$  приналежних їм елементів.

Для розрахунку координат точок станції на оргграфі схеми будується кістякове дерево  $\bar{G} = (V, \bar{E})$  з використанням алгоритму пошуку в глибину (рис. 2). Це дозволяє контролювати наявність у схемі замкнутих контурів і при необхідності автоматично коректувати розрахунок вставок. Розрахунок починається з пошуку горизонтальних колій, визначення ординат яких здійснюється з використанням заданої ширини міжколій.

Вихідна модель станції містить усі необхідні розміри плану колійного розвитку станції і забезпечує його графічне відображення на екрані дисплея; передбачене її представлення у форматі AutoCAD для побудови креслення. Модель також включає дані про повну і будівельну довжини колій.

В якості моделі гіркових горловин використане параметризоване бінарне ордереву  $G_T = (V, E)$ . На базі цієї моделі розроблено ітераційний метод розрахунку невідомих кутів повороту в додаткових кривих на спускній частині гірки. Чергове наближення невідомого кута  $b_{k+1}$  визначається за допомогою рекурентного виразу:

$$b_{k+1} = b_k + \text{sign}(Y - y(b_k)), \quad b_0 = 0, \quad (1)$$

де  $D_b$  - крок ітерації;

$Y$  - задана ордината розрахункової колії;

$y(b_k)$  - попереднє наближення ординати розрахункової колії.

Величина  $y(b_k)$  обчислюється як сума проекцій елементів розрахункової колії на вертикальну вісь; ітераційний процес продовжується, поки  $pY - y(b_k) - \epsilon > 0$ .

Сформульовано задачу оптимізації параметрів з'єднувальних кривих на сортувальних коліях, розроблений інтерактивний метод їх розрахунку з графічною візуалізацією результатів і контролем ширини міжколій суміжних колій. З цією метою розроблений метод визначення координат точок, в яких досягається мінімальна задана ширина міжколій. Метод заснований на побудові еквідистант суміжних колій і визначенні точки їх перетинання.

Виконана програмна реалізація підтвердила ефективність розроблених геометричних моделей і алгоритмів параметричного синтезу плану колійного розвитку станцій.

У **третьому розділі** розглядається функціональна модель розв'язки, яка базується на імітаційному моделюванні руху потоків поїздів на підходах до станцій та їх пропуску через пункти пересічення і злиття ліній.

Ієрархічна структура функціональної моделі розв'язки розроблена з використанням системного підходу. На метарівні розв'язка розглядається як керована система масового обслуговування (СМО), яка призначена для пропуску поїздів з ліній, що примикають. На макрорівні модель розв'язки включає модель руху потоків поїздів, а також модель системи регулювання руху поїздів та їх пропуску через пункти пересічення. На мікрорівні виконується моделювання руху окремого поїзда. Модель руху поїзда побудована на основі диференціального рівняння другого порядку, у якому незалежною змінною є час:

$$sI = \frac{d^2 s}{dt^2} = \frac{g}{1 + \gamma} \cdot (f_k - w_k - b_T) \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

де  $g/(1+g)$ - прискорення сили тяжіння з урахуванням мас, що обертаються;  
 $f_k, w_k, b_T$ - відповідно, питомі сили тяги, опору і гальмування.

Дане рівняння дозволяє синхронізувати рух окремих поїздів у потоці між собою і з роботою пристроїв залізничної автоматики. Вибір режимів руху поїздів здійснюється з урахуванням показань світлофорів і діючих обмежень швидкості.

Використання рівняння (2) стало можливим внаслідок сплайн-апроксимації поздовжнього профілю, що, крім того, дозволило розробити ефективний метод визначення точок початку гальмування поїздів (рис. 3). При наближенні поїзда до ділянки обмеження швидкості, або до світлофора, що вимагає її зниження, включається алгоритм сканування, побудований на основі диференціального рівняння, у якому незалежною змінною є шлях:

$$v' = \frac{dv}{ds} = \frac{g}{1 + \gamma} \cdot \frac{f_k - w_k - b_T}{v} \cdot 10^{-3}, \quad v > 0 \quad (3)$$

За допомогою даного рівняння перед кожним кроком переміщення поїзда здійснюється розрахунок його можливої швидкості в точці обмеження у випадку початку службового гальмування на цьому кроці. У залежності від співвідношення розрахованої і припустимої швидкостей приймається рішення про початок гальмування поїзда на даному кроці. При цьому використання неперервної сплайн-апроксимації профілю в поєднанні з числовими методами забезпечує необхідну точність вирішення рівняння (3) при використанні всього одного кроку інтегрування, який дорівнює поточній відстані до найближчої точки обмеження швидкості.

Функціональна модель системи регулювання руху поїздів забезпечує перемикування

прохідних світлофорів автоблокування і вхідних світлофорів у пунктах пересічення і злиття ліній. В якості моделі системи регулювання обраний детермінований скінченний автомат Мілі:

$$A_{\Pi} = A(\mathbf{X}, \mathbf{Z}, \mathbf{S}, F_z, F_s) \quad (4)$$

У автоматі  $A_{\Pi}$  (4) вхідний алфавіт  $\mathbf{X}$  утворюють сигнали про заняття і звільнення поїздами окремих рейкових кіл, а також команди про встановлення маршрутів їх пропуску через пункти пересічення і злиття ліній (див. рис. 4).

Вихідний алфавіт  $\mathbf{Z}$  являє собою сукупність номерів і сигнальних показань світлофорів, що перемикаються.

Множина станів  $\mathbf{S}$  автомата  $A_{\Pi}$  являє собою декартовий добуток множин наборів встановлених маршрутів  $\mathbf{M}$  і станів рейкових кіл пересічення  $\mathbf{C}$ :  $\mathbf{S} = \mathbf{M} \text{ Д } \mathbf{C}$ . Кожен стан  $A_{\Pi}$  представляється кортежем  $(m_1, m_2, \dots, m_n, c_1, c_2, \dots, c_n)$ , де  $(m_1, m_2, \dots, m_n)$  - бульовий вектор встановлених маршрутів, а  $(c_1, c_2, \dots, c_n)$  - бульовий вектор стану рейкових кіл пункту пересічення.

Функції виходів  $F_z$  і переходів  $F_s$  представлені в табличній формі. Розроблено методику синтезу автоматів для пунктів пересічення і злиття ліній з різними схемами колійного розвитку та з урахуванням пропуску поїздів з різним пріоритетом. Автомат (4) є частковим і допускає можливість його мінімізації. Дослідження результатів мінімізації автоматів для різних схем розв'язок показали, що формальними методами можна скоротити обсяг таблиць переходів і виходів не більше ніж на 40%. У зв'язку з цим розроблена методика скорочення кількості станів автомата за рахунок зміни вхідних сигналів і структури його внутрішніх станів, що для окремих схем розв'язок дозволяє більш ніж у 2 рази зменшити обсяг зазначених таблиць.

Модель розв'язки може працювати в автоматичному режимі і як ергатична. Для роботи моделі в автоматичному режимі розроблений алгоритм вибору черговості пропуску через пересічення поїздів з різним пріоритетом. В ергатичній моделі дисципліну пропуску поїздів визначає людина, яка виконує моделювання. Дані про поточне поїзне положення на лініях розв'язки, які необхідні для прийняття рішень, оператор одержує за допомогою інформаційної моделі розв'язки.

Для оцінки ефективності функціонування розв'язок розроблено методику розрахунку витрат, пов'язаних з рухом поїздів та їх можливими затримками, що базується на системі одиничних норм. Беручи до уваги випадковий характер пропуску потоків поїздів через пункти пересічення та злиття ліній, з допомогою цієї методики за результатами моделювання визначається середня вартість пробігу одного поїзда у межах розв'язки.

**Четвертий розділ** присвячений функціональному моделюванню станцій, що є необхідним для одержання їх техніко-експлуатаційних показників, а також для визначення експлуатаційних витрат станцій.

Залізнична станція чи її окремий технологічний комплекс розглядається на метарівні як багатофазна багатоканальна СМО. Розроблено методику формалізації технологічних процесів станцій на базі структурно-часових таблиць операцій при довільній кількості фаз обслуговування й обслуговуючих пристроїв. Рядок таблиці характеризує елементарну технологічну операцію і представляється структурою:

$$W_i = \{w, p, f, r, M[t], s_t\}, \quad i = 0, \dots, n-1 \quad (5)$$

де  $w$ - список операцій, по закінченні яких може бути почата дана операція;  $p$ - спеціалізація виконавця операції;  $f$ - фактор безперервності операцій;  $r, M[t], s_t$  - відповідно, закон розподілу, математичне очікування і середнє квадратичне відхилення випадкової величини

часу виконання операції  $t$ ;  $n$ -кількість операцій.

Загальна тривалість обробки заявки (поїзда) пов'язана з роботою усіх виконавців, що робить її залежною від поточного стану системи (див. рис. 5). У цьому полягає перевага даного підходу перед традиційним, в якому загальний час обробки заявки розглядається як незалежна випадкова величина.

Методика допускає можливість моделювання обслуговування неоднорідного потоку заявок, що вимагають різної технології обробки.

Для відображення операцій, пов'язаних з переміщеннями рухомого складу по станції (рис. 5, операції 1,5,13,15,16), використовується метод імітаційного моделювання. При цьому на макрорівні розглядається переміщення всіх об'єктів, що рухаються на даному кроці моделювання. Для синхронізації паралельних процесів переміщення об'єктів між собою і з роботою пристроїв станційної автоматики, у моделі введений системний час, що змінюється дискретно з кроком  $Dt$ .

На мікрорівні виконується імітаційне моделювання руху кожної одиниці рухомого складу на кроці  $Dt$ . Розроблено наближену модель переміщення об'єктів, що базується на припущенні про їх рівноприскорений рух.

Для моделювання переміщень використовується геометрична модель станції, на основі якої попередньо будується ліс маршрутів у горловинах, а потім список можливих маршрутів  $M_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ . Кожний маршрут представляється множиною ізольованих стрілочних і колійних секцій  $M_i = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$ , які займає об'єкт під час руху по маршруту. Розроблено методику автоматичної побудови списку маршрутів на основі проходження лісу в глибину.

Моделювання переміщень рухомого складу вимагає перевірки вільності маршрутів руху, для чого на макрорівні використовується модель системи електричної централізації (ЕЦ) стрілок і сигналів. В якості моделі ЕЦ використаний детермінований скінченний автомат

$$A=A(\mathbf{X}, \mathbf{Z}, \mathbf{S}, F_z, F_s), \quad \mathbf{X}=\{\mathbf{X}_0, \mathbf{X}_1\}, \quad (6)$$

де -  $\mathbf{X}_0 = (x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0m})$ ,  $x_{0i} \in \{0, 1\}$ - сигнали від рейкових кіл;

$\mathbf{X}_1 = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n})$ ,  $x_{1j} \in \{0, 1\}$ - заявки на відкриття світлофорів;

$\mathbf{Z} = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ ,  $z_j \in \{0, 1, 2\}$ - показання світлофорів;

$\mathbf{S} = (x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0m}, x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n})$ , - внутрішній стан автомата.

Функціонування автомата  $A$  для станцій описується сукупністю булевих функцій.

Використання таблиць переходів і виходів для станцій, де велика кількість рейкових кіл, сигналів і маршрутів, виявилось неефективним через їх значну розмірність.

Потік поїздів, які надходять на станцію з кожної лінії, що примикає, представляється послідовністю векторів випадкових параметрів поїздів і моментів їх появи.

Основною відмінною рисою запропонованих функціональних моделей станцій є те, що в них людина бере безпосередню участь у моделюванні, виконуючи функції диспетчера (ергатичні моделі). Для цього до складу функціональної моделі станції включені інформаційна модель, що дозволяє контролювати станційні процеси і приймати потрібні рішення, а також засоби для вибору маршрутів руху і їх реалізації.

Для прискорення процесу моделювання ергатична модель переводиться в режим реального часу тільки при очікуванні команди особи, яка виконує моделювання.

Експерименти з розробленою ергатичною моделлю парку прибуття сортувальної станції показали, що вона дозволяє виконати моделювання його добової роботи приблизно за 30 хвилин. Адекватність моделі доведена статистичними методами (порівнянням результатів моделювання з реальними даними за допомогою критерію

Ван дер Вардена).

**П'ятий розділ** присвячений проблемі удосконалення моделей процесу скочування відчепів і розпуску составів із сортувальної гірки. Виконано дослідження неперервної сплайн-апроксимації поздовжнього профілю гірки. Розроблено методику його апроксимації кубічним сплайном:

$$P_i(s) = C_{1i} + C_{2i}(s-s_i) + C_{3i}(s-s_i)^2 + C_{4i}(s-s_i)^3, \quad (7)$$

де  $s_i$ - вузли сплайна,  $i=1, \dots, n$ ;  $s$ -довільна точка,  $s_i \leq s \leq s_{i+1}$ .

Коефіцієнти сплайна визначаються як

$$C_{1i} = P_i(s_i) = h(s_i),$$

$$C_{2i} = P_i'(s_i) = K_i,$$

$$C_{3i} = P_i''(s_i)/2 = (3 Dh_i/ Ds_i - 2K_i - K_{i+1})/ Ds_i,$$

$$C_{4i} = P_i'''(s_i)/6 = (K_i + K_{i+1} - 2 Dh_i/ Ds_i)/ Ds_i^2$$

де  $K_i$  - кутовий коефіцієнт дотичної в  $i$ -му вузлі.

Виконані дослідження показали, що погрішності обчислення відміток профілю при сплайн-апроксимації значно менші, ніж при кусково-лінійній. Однак недоліком звичайного кубічного сплайна є те, що значення першої похідної сплайн-функції (ухилу) на прямолінійних ділянках з постійним ухилом істотно змінюється (на швидкісній ділянці гірки з ухилом 50 % перша похідна змінюється від 42,2 до 53,7 %). У зв'язку з цим отриманий спочатку сплайн був перетворений у сплайн дефекту 2, що має розриви другої похідної у точках сполучення прямолінійних ділянок з вертикальними круговими кривими. Він забезпечує практично точну апроксимацію проектного профілю гірки (різниця відміток проектного профілю і відповідних значень модифікованої сплайн-функції  $h=f(s)$  не перевищує 0,1 мм; на прямолінійних ділянках ця різниця взагалі відсутня).

Неперервна апроксимація профілю дозволяє використовувати числові методи вирішення диференціальних рівнянь руху відчепів, що дає можливість розглядати діючі сили опору руху як змінні величини на кожному кроці моделювання. Крім того, вона дозволяє використовувати для моделювання рівняння, в яких незалежною змінною є час, що істотно спрощує синхронізацію насування состава і скочування групи відчепів.

Для оцінки ефективності зазначених пропозицій щодо удосконалення моделі скочування відчепів були виконані дослідження різних форм диференціального рівняння руху (з розділеними змінними  $f(s)ds = f_1(v)dv$  та  $f(t)dt = f_1(v)dv$ , а також вирішені відносно похідної  $v' = f(s,v)$  та  $v' = f(t,v)$ , у т.ч. і рівняння 2-го порядку  $s'' = f(t,s,s')$ ). Для вирішення рівнянь з розділеними змінними використовувалися аналітичні методи різної точності (в наближеному методі опір повітряного середовища, а також опір від стрілок та кривих розглядаються на кожному кроці як постійні величини, а у точному – як функції швидкості відчепів). Для інших рівнянь використовувалися числові методи (Ейлера, Рунге Кутта II і IV порядку, а також Гілла). Усі розглянуті методи були реалізовані на ЕОМ, для чого були розроблені алгоритми обчислення сил, що діють на відчепи на кроці інтегрування, при виборі в якості незалежних змінних часу і шляху. Ці алгоритми використовувалися для аналізу точності і швидкодії відповідних методів.

З огляду на те, що точність вирішення рівнянь руху залежить від параметрів гірки і

(8)

відчепів, а також від умов їх скочування, були виконані дослідження впливу перелічених факторів на погрішність розглянутих методів. Для оцінки впливу 10 різних факторів була використана 1/32 репліка плану повного факторного експерименту  $2_{IV}^{10-5}$  з роздільною здатністю IV; рівні варіювання факторів наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Фактор	Рівні варіювання факторів	
	Верхній рівень	Нижній рівень
Початкова швидкість $v_0$ , м/с	5,0	2,0
Ухил $i$ , ‰	40,0	1,0
Основний опір $w_0$ , н/Кн	5,0	0,5
Вага вагона $Q$ , т	70,0	22,0
Швидкість вітру $v_{віт}$ , м/с	5,0	-5,0
Напрямок вітру $b$ , град	20,0	0,0
Кількість вагонів $n$	5	1
Коефіцієнт $K_{СК}$	0,09	0,06
Тип вагонів	цистерна	піввагон
Температура повітря $T$ , °С	10,0	-15,0

Для реалізації даного плану було виконано 32 обчислювальних експерименти з кожним методом; крім того, при кожному методі варіювався крок інтегрування ( $Ds=1, 5, 10, 20, 40$  м, або  $Dt=0,25, 0,5, 1, 5, 10$  с). По кожному методу була виконана статистична обробка абсолютної і відносної погрішностей швидкості відчепа в кінці ділянки інтегрування; при цьому, у якості еталонного був прийнятий метод Гілла з кроком 0,1м. У результаті досліджень був встановлений вплив величини кроку інтегрування на максимальну погрішність моделювання для всіх розглянутих методів (див. рис. 6). Для оцінки і порівняння ефективності розроблених методів і відповідних алгоритмів для кожного з них були визначені припустимий крок інтегрування, при якому максимальна абсолютна погрішність методу не перевищує 0,01 м/с, а також швидкодія методу. Виявилось, що при використанні числових методів вибір незалежної змінної істотно впливає на погрішність моделювання (погрішність інтегрування рівняння  $v' = f(t, v)$  на порядок менше, ніж  $v' = f(s, v)$ ).

У результаті виконаних досліджень встановлено, що найбільш ефективною моделлю скочування є рівняння  $s'' = f(s, s')$  у поєднанні з методом Рунге-Кутта IV порядку. При необхідності вибору в якості незалежної змінної шляху доцільно використовувати рівняння першого порядку  $v' = f(s, v)$ .

На базі виконаних досліджень була розроблена модель розпуску составів, що дозволяє імітувати паралельні процеси насування состава і скочування відчепів. Для її реалізації необхідно було удосконалити моделі гірки і відчепа, а також методи моделювання його руху.

Розроблена модель гірки має деревоподібну структуру і забезпечує імітацію роботи уповільнювачів та переводу стрілок, контроль нерозділень і нагонів, моделювання проштовхування вагонів і заповнення сортувальних колій.

Для моделювання скочування відчепів в основному використовується диференціальне рівняння  $s'' = f(s, s')$  із кроком  $Dt$ . Для врахування взаємодії відчепа з наземними пристроями крок  $Dt$  може бути розділений на частини  $Dt_j$ , кожній з яких відповідає деяка відстань  $Ds_j$ , що обумовлена положенням цих пристроїв на шляху скочування.

При цьому, сума кроків  $Ds_i$  повинна дорівнювати відстані  $Ds$ , яку відцеп пройде за час  $Dt$  ( $Ds = Ds_1 + Ds_2 + \dots + Ds_{k+1}$ ). На кроках  $Ds_i$  ( $i=1, \dots, k$ ) рух відчепа моделюється за допомогою диференціального рівняння  $v' = f(s, v)$ . На останньому  $(k+1)$ -му кроці переміщення відчепа моделюється за допомогою рівняння  $s'' = f(s, s')$ ; при цьому величина кроку визначається як

$$\Delta t_{k+1} = \Delta t - \sum_{i=1}^k \Delta t_i \quad (9)$$

Розроблений метод моделювання руху відчепа з роздібненим кроком  $Dt$  дозволяє визначити швидкість  $v_j$  і час  $t_j$  проходження кожною його віссю наземних пристроїв гірки і у той же час забезпечити синхронність руху усіх відцепів.

Наприкінці кожного кроку моделювання розпуску  $Dt$  виконуються дії:

- контроль зміни стану всіх рейкових кіл гірки та визначення інтервалів між відчепами на розділових елементах;
- перевірка необхідності та можливості переводу стрілок між відчепами і його імітація;
- контроль нагонів відцепів, при виявленні яких моделюється співударення і з'єднання відцепів, а також прошовхування зупинених вагонів;
- контроль відриву чергового відчепа від состава і при його фіксації - коректування моделі состава і формування вісьової моделі нового відчепа.

Модель розформування составів на гірці може працювати в автоматичному режимі або як ергатична. У першому випадку в модель повинний бути включений модуль, що імітує роботу системи керування сповільнювачами. В другому випадку людина безпосередньо бере участь у моделюванні і виконує функції гіркового оператора. Ергатична модель може використовуватися для досліджень як механізованих, так і автоматизованих сортувальних гірок, на яких, як показали дослідження, спостерігаються значні втручання операторів у процес керування розпуском.

Програмна реалізація ергатичної моделі розпуску була використана при створенні тренажера оператора сортувальної гірки.

Для одержання випадкового потоку составів, що розформовуються, та їх відцепів використовується статистичне моделювання параметрів окремих вагонів, а також заповнення сортувальних колій перед розпуском состава. Запропоновано новий метод моделювання призначень відцепів, у якому використовується матриця умовних ймовірностей прямування вагонів состава на окремі призначення  $\{z p_{ij}\}_{z(m+1) \times m}$ .

Кожен елемент матриці  $p_{ij}$ ,  $i=1, \dots, m$  є умовною ймовірністю прямування вагона на  $j$ -у колію, визначеною за умови, що попередній вагон прямує на  $i$ -у колію. Матриця  $\{z p_{ij}\}_{z}$  може бути отримана на основі статистичної обробки сортувальних листків на гірці. В одержаних у такий спосіб составах випадкова кількість вагонів у відцепі має геометричний розподіл, що відповідає характеру потоку відцепів на діючих гірках. Крім того, у составах зберігаються зв'язки між призначеннями суміжних відцепів. Розроблені моделі були використані для ідентифікації алгоритму керування розпуском в АСУ РСГ, а також для пошуку шляхів підвищення якості заповнення сортувальних колій вагонами при розпуску составів.

**Шостий розділ** присвячений дослідженням і оптимізації режимів гальмування відцепів состава, що розформовується. Відповідно до Правил і норм проектування сортувальних пристроїв, варіанти гірки, що конкурують, повинні оцінюватися за допомогою імітаційного моделювання розпуску потоку составів. При цьому, для

визначення граничних можливостей гірки при моделюванні потрібно використовувати оптимальні режими гальмування відчепів состава. У зв'язку з цим були виконані дослідження режимів гальмування та удосконалення методів їх оптимізації. В результаті імітаційного моделювання скочування відчепів встановлено, що область припустимих режимів гальмування (ОПР) розташована на площині, що може бути описана рівнянням

$$h\ddot{y} + ah\ddot{y}\ddot{y} + bh\ddot{y}\ddot{y}\ddot{y} + c = 0, \quad (10)$$

де  $h\ddot{y}$ ,  $h\ddot{y}\ddot{y}$ ,  $h\ddot{y}\ddot{y}\ddot{y}$  - енергетична висота, що погашається, відповідно, на I, II, і III гальмових позиціях;

$a$ ,  $b$ ,  $c$ -коефіцієнти, що залежать від параметрів відчепа й умов скочування.

Межі ОПР визначаються технічними та технологічними обмеженнями величин  $h\ddot{y}$ ,  $h\ddot{y}\ddot{y}$ ,  $h\ddot{y}\ddot{y}\ddot{y}$ . Проекція ОПР на координатну площину  $h\ddot{y}0h\ddot{y}\ddot{y}$  для дуже хорошого бігуна (ДХ) у зимових умовах показана на рис. 7.

Для аналізу режимів інтервального регулювання були виконані дослідження

залежності часу скочування відчепів до заданої точки  $s$  від режиму гальмування  $t^{(s)} = f(h\ddot{y}, h\ddot{y}\ddot{y})$ . Виявилось, що дана залежність істотно нелінійна (див. рис. 7); була поставлена задача її структурно-параметричної ідентифікації з використанням множинного лінійного регресійного аналізу. Пошук здійснювався в класі нелінійних функцій; при цьому усього було розглянуто 22 моделі. У результаті досліджень була обрана модель, що забезпечує необхідний компроміс між вимогами простоти моделі і її точності:

$$t = \frac{1}{b_0 + b_1 h' + b_2 h'' + b_{12} h' h'' + b_{11} (h')^2 + b_{22} (h'')^2} \quad (11)$$

Отримана модель використовувалася для аналізу умов розділення відчепів на стрілках; ці умови характеризуються величиною інтервалів  $dt$  між відчепами на ізольованих ділянках стрілок:

$$dt_i = t_{0i} + t_{i+1} - t_i,$$

де  $t_{0i}$  - початковий інтервал між  $i$ -м та  $(i+1)$ -м відчепами на вершині гірки;

$t_i$ ,  $t_{i+1}$  - час руху  $i$ -го та  $(i+1)$ -го відчепів, відповідно, до моментів звільнення та заняття розділової стрілки.

Для дослідження закономірностей процесу розділення відчепів спочатку була розглянута розрахункова група відчепів ДП-ДХ-ДП, для якої була розроблена методика оптимізації режиму гальмування середнього відчепа (ДХ). При цьому оптимальним вважався такий режим, при якому  $\min\{dt_1, dt_2\} \rightarrow \max$ . У результаті досліджень був отриманий важливий висновок про те, що оптимальний режим гальмування відчепа завжди знаходиться на межі ОПР. Вибір ділянки межі однозначно визначається комбінацією номерів розділових стрілок першої і другої пар відчепів.

Даний висновок дозволив перейти до однофакторної моделі керованого скочування  $t=f(q)$ ; для цього було використано параметричне представлення рівнянь ділянок межі ОПР ( $h\ddot{y}=b_1+k_1q$ ,  $h\ddot{y}\ddot{y}=b_2+k_2q$ ). Зазначена модель являє собою кусково-багаточленну функцію, що має розриви першої похідної у вузлах межі ОПР (див. рис. 8).

Загальна постановка задачі оптимізації режимів гальмування відчепів состава з  $n$  відчепів має вигляд:

знайти максимум функції

$$f = \min\{dt_i = t_{0i} + t_{i+1}(q_{i+1}) - t_i(q_i)\}, \quad i = 1, \quad (12)$$

...,  $n-1$ ,

при обмеженнях:  $q_1 = q_1^{min}, q_n = q_n^{max}$ ,

$$q_i^{min} \leq q_i \leq q_i^{max}, \quad i = 2, \dots, n-1,$$

Цільова функція  $f$  нелінійна і негладка, тому спочатку для вирішення задачі були використані методи прямого пошуку: адаптивний метод випадкового пошуку і метод комплексів Бокса. Тестування показало невисоку ефективність зазначених методів для вирішення даної задачі і тому надалі були використані градієнтні методи. З цією метою задача оптимізації (12) була перетворена в гладку шляхом введення додаткової змінної  $Z$ , яка розглядається як нижня границя для всіх значень інтервалів  $dt_i$ , що перетворені в обмеження. Задача в такій постановці вирішувалася методом послідовної безумовної оптимізації Фіакко і Мак-Корміка, а також методом припустимих напрямків Топкіса-Вейнотта. Зазначені методи дали кращі результати, ніж методи прямого пошуку, однак, вони також не позбавлені недоліків. Перший з них не забезпечує збіжності при деяких початкових точках оптимізації; другий метод виявився стійким і вимагає невеликої кількості ітерацій, однак має дуже громіздкий обчислювальний алгоритм.

Найкращим для вирішення даної задачі виявився розроблений автором багатокроковий двоетапний метод оптимізації, заснований на ідеях динамічного програмування, але з використанням максимінного критерію. На першому етапі для кожного відчепа состава визначаються умовні оптимальні режим гальмування й інтервал з попереднім відчепом. Для цієї мети використовується основне рівняння динамічного програмування, що представляється у вигляді:

$$dT_i(q_i) = \max_{q_i} \min \{dT_{i-1}(q_{i-1}, q_i)\} \quad (13)$$

Рекурентний вираз (13) визначає умовний оптимальний інтервал для частини состава від  $(i-1)$ -го відчепа і до його кінця при умові, що режим гальмування  $(i-1)$ -го відчепа є  $q_{i-1}$ . При цьому режим гальмування  $i$ -го відчепа  $q_i = q_i^*(q_{i-1})$ , при якому  $dT_{i-1}$  досягає максимуму, є умовним оптимальним режимом при даному  $q_{i-1}$ .

На другому етапі визначається безумовне оптимальне керування розпуском за допомогою рекурентних функцій  $q_i^*(q_{i-1})$ , отриманих на етапі умовної оптимізації, за схемою:

$$(q_{n-2}) \textcircled{\textcircled{}} q_{n-1}^{\text{опт}} \quad (14)$$

Програмна реалізація даного методу показала, що він має найбільшу швидкодію і забезпечує високу точність вирішення. Головна ж його перевага в тому, що він не тільки максимізує мінімальний інтервал, але і забезпечує оптимальне розподілення інших інтервалів між відчепами состава, чого не виконують інші розглянуті методи. Розроблений метод оптимізації може бути використаний як для оцінки проектів сортувальних гірок, так і для автоматизації керування розпуском составів.

У **сьомому розділі** виконані теоретичні дослідження і розроблені методи функціонального моделювання та оптимізації процесу формування составів. При цьому основна увага приділена формуванню багатогрупних составів, яке потребує значних витрат часу і маневрових засобів.

Встановлені фактори, що істотно впливають на процес формування: це початкова

невпорядкованість состава, вибір методу і схеми формування, тип сортувального пристрою і його параметри, кількість вагонів і груп у составі.

Доведена доцільність використання початкової упорядкованості вагонів состава при пошуку оптимальної схеми його формування. Для її використання розроблений алгоритм заміни дійсних номерів груп (призначень) логічними, що дозволяє в багатьох випадках істотно зменшити час формування.

Запропоновано новий (розподільний) метод формування, який для частини составів виявляється ефективнішим відомого комбінаторного методу.

Формування состава з  $q$  логічних груп на  $m$  коліях здійснюється за  $N$  етапів (етап включає збирання вагонів з  $m_3\delta$  колій і їх сортування на  $m_c$  колій):

а) комбінаторний метод

$$N = q - m + 1, \quad q = 2m-1, 2m, \dots \text{ так, щоб}$$

$$F_{q-1}^{(m)} < \theta \leq F_q^{(m)}, \quad (15)$$

де  $F_{q-1}^{(m)}, F_q^{(m)}, \dots$  - послідовність узагальнених чисел Фібоначчі порядку  $m$ .

б) розподільний метод

$$N = \lceil \lg q / \lg m \rceil + 1 \quad (16)$$

Встановлено, що для більшості составів кожний з методів можна реалізувати з використанням множини  $S$  різних схем формування  $s_j$ , що відрізняються часом  $T_\Phi$  ( $S = (s_1, s_2, \dots, s_z)$ ). Кількість можливих схем формування  $Z$  визначається як

$$Z = \binom{\theta}{\Theta_N^{(m)}} = \frac{\Theta_N^{(m)}!}{\theta!(\Theta_N^{(m)} - \theta)!}, \quad (17)$$

де  $\Theta_N^{(m)}$  - максимальна кількість груп, при якій состав може бути сформований даним методом на  $m$  коліях за  $N$  етапів.

Задача оптимізації схеми формування є екстремальною комбінаторною задачею великої розмірності, для якої не існує ефективного методу вирішення. Але було встановлено, що час  $T_\Phi$  для множини схем формування окремого состава являє собою випадкову величину (див. рис. 9). На цій основі розроблений наближений статистичний метод вибору раціональної схеми, який базується на використанні непараметричної однобічної толерантної границі, що може бути визначена за даними випадкової вибірки схем  $S^* M S$  об'ємом  $n_0$ :

$$T_\Phi(s^*) = \min\{T_\Phi(s_k)\}, \quad s_k \in S^*, \quad k=1, \dots, n_0 \quad (18)$$

Величина  $n_0 = |S^*|$  визначається з умови  $\alpha^{n_0} \leq 1 - \beta$ ; при  $n_0=299$  можна зі статистичною надійністю  $b=0,95$  стверджувати, що, принаймні, частка  $a=0,99$  генеральної сукупності значень  $T_\Phi$  перевищує  $T_\Phi(s^*)$ . Як показали дослідження, запропонований статистичний метод дозволяє скоротити час формування составів на 20-35%.

Формалізовано одержання схем формування составів комбінаторним і розподільним методами. Для цього логічні номери груп  $g_i$  були представлені, відповідно, у фібоначчійовій і позиційній системах числення:

$$\gamma_i = F_{m+N-1}^{(m)} \varphi_N + F_{m+N-2}^{(m)} \varphi_{N-1} + \dots + F_m^{(m)} \varphi_1, \quad (19)$$

де  $j_N, j_{N-1}, \dots, j_1$  - цифри фібоначчійового представлення  $g_i$ ; ( $j_j \in \{0, 1\}, j_N=0$ ).

б) розподільний метод

$$\gamma_i = y_N m^{N-1} + y_{N-1} m^{N-2} \dots + y_1 m^0, \quad (20)$$

де  $y_N, y_{N-1}, \dots, y_1$  - цифри представлення  $g_j$  у позиційній системі числення з основою  $m$  ( $y_j \in \{0, m-1\}, y_N \neq 0$ ).

Окремі цифри логічного номера  $g_j$  (19) чи (20) використовуються для визначення логічних номерів колій призначення  $i$ -го відчепа на кожному етапі формування як при збиранні вагонів з колій, так і при їх сортуванні.

Для досліджень методів формування, а також для пошуку їх раціональних схем була розроблена імітаційна модель процесу формування, що дозволяє визначити час формування  $T_\Phi$  для конкретних составів при різних типах сортувальних пристроїв, кількості сортувальних колій, методах і схемах формування:

$$T_\Phi = \sum_{j=1}^N (t_{cj} + t_{збj}) \quad (21)$$

Розрахунок часу сортування вагонів  $t_{cj}$  на витяжних коліях на  $j$ -му етапі здійснюється з урахуванням часу кожного напіврейса осаджування  $t_{осi}$  і витягування  $t_{вигi}$ :

$$t_{cj} = \sum_{i=1}^{n_{вдчj}} (t_{осi} + t_{вигi}), \quad (22)$$

де  $n_{вдчj}$  - кількість відчепів у составі на  $j$ -му етапі формування.

При сортуванні вагонів на гірках величина  $t_{cj}$  визначається як час розпуску состава:

$$t_{cj} = (0,06 l_{ваг} \sum_{i=1}^{n_{вдчj}} c_i) / V_p, \quad (23)$$

де  $l_{ваг}$  - середня довжина вагона;

$c_i$  - кількість вагонів у  $i$ -му відчепі;

$V_p$  - середня швидкість розпуску.

Час збирання вагонів  $t_{збj}$  у (21) визначається за допомогою формули, аналогічної (22).

Розроблені моделі і методи були використані для дослідження процесу формування составів при різних типах сортувальних пристроїв та кількості колій. Зокрема, встановлено, що збільшення кількості сортувальних колій не завжди дозволяє істотно зменшити час формування составів (див. рис. 10).

Для кожного состава існує оптимальна кількість сортувальних колій  $m_0$ , яка забезпечує мінімальний час формування  $T_\Phi$ . Величина  $m_0$  істотно залежить від типу сортувального пристрою. Виявилось, що при використанні гірки оптимальна кількість сортувальних колій в середньому майже у 2 рази менша, ніж при формуванні составів на витяжній колії (див. рис. 11).

Аналіз використання довжини сортувальних колій показав, що розподіл потрібної питомої місткості колій, що припадає на один вагон состава, не залежить від типу сортувального пристрою та параметрів состава (див. рис. 12).

Таким чином, лише невелика частина колій повинна мати довжину, необхідну для розміщення всього сформованого состава; інші колії можуть бути коротшими. Отримані залежності необхідні для техніко-економічного обґрунтування параметрів пристроїв для формування составів; в умовах конкретних станцій ці залежності можуть бути отримані з допомогою розробленої моделі.

Імітаційна модель формування составів може бути використана також для оперативного керування цим процесом на станціях. За допомогою розробленої моделі

можна знайти для кожного конкретного состава раціональну схему формування з урахуванням наявної кількості сортувальних колій і їх місткості.

У **додатках** приведені методики та алгоритми моделювання окремих елементів функціональних підсистем станцій, приклади результатів моделювання, які отримані за допомогою програм, що були розроблені при виконанні дисертаційної роботи, а також довідки про використання її результатів.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримане нове вирішення актуальної наукової проблеми удосконалення конструкції і технології роботи залізничних станцій з використанням інтегрованої системи структурно-параметричних і функціональних моделей.

Розроблена система моделей дозволяє автоматизувати вирішення задач аналізу і синтезу станцій; вона може бути покладена в основу автоматизованої системи підтримки прийняття рішень, яка дозволить отримувати кількісну оцінку заходів, спрямованих на поліпшення техніко-технологічних параметрів станцій, і використовувати її для мінімізації простою вагонів і експлуатаційних витрат станцій. Основні наукові результати і висновки дисертації полягають у наступному:

1. Виконаний аналіз математичних методів і моделей залізничних станцій показав, що методи прямого синтезу оптимальних рішень у даний час розвинуті недостатньо. У зв'язку з цим система моделей повинна підтримувати ітераційний процес удосконалення вихідного варіанта станції на основі послідовного багаторазового вирішення задач аналізу і синтезу.

2. Відповідно до системного підходу інтегрована система повинна включати структурні (геометричні) і функціональні моделі станцій. Геометричні моделі відображують конструкцію колійного розвитку станцій і використовуються для автоматизації параметричного синтезу. Функціональні моделі необхідні для аналізу роботи станцій при заданих параметрах технічних засобів, технології та умовах експлуатації; при цьому інформаційною базою функціональних моделей повинні служити їх геометричні моделі.

3. Система геометричних моделей станцій (вхідна, внутрішня і вихідна), побудованих на основі зважених орграфів, дозволяє здійснити графічне введення у ЕОМ немасштабної схеми станції, автоматизувати її топологічний аналіз, розрахунок та побудову креслення плану колійного розвитку станції.

4. Розроблено теоретичні основи функціонального моделювання станцій.

4.1. Для вирішення задач аналізу станцій, відповідно до теорії взаємодії їх підсистем, інтегрована система повинна включати функціональні моделі 4-х типів: підходів до станції (розв'язок), приймально-відправних парків, сортувальних гірок і районів формування.

4.2. Складність станцій і їх підсистем обумовлює ієрархічну трьохрівневу структуру функціональних моделей. На метарівні станція розглядається як багатофазна багатоканальна система масового обслуговування неоднорідного потоку заявок. На макрорівні здійснюється моделювання руху потоків поїздів, технологічних процесів їх обробки у парках, розформування і формування составів, а також роботи систем залізничної автоматики, що регулюють рух транспортних одиниць. На мікрорівні моделюється переміщення окремих об'єктів з використанням диференціальних рівнянь.

4.3. Сформульована концепція ергатичних імітаційних моделей станцій, у яких людина бере безпосередню участь у процесі моделювання, виконуючи функції диспетчера. Розроблено методологію побудови цих моделей, створені моделі окремих

підсистем сортувальної станції (розв'язки, парку прибуття, гірки). Апробація моделі парку прибуття показала, що вона в 50 разів прискорює реальний процес і дозволяє одержати кількісну і неформальну якісну оцінку станції експертом, що виконує моделювання. Для перевірки адекватності моделі парку прибуття використаний критерій Ван дер Вардена; з його допомогою була підтверджена гіпотеза про приналежність вибірок часу простою поїздів, отриманих на реальній станції і методом моделювання, одній генеральній сукупності. Встановлено, що ергатичні моделі можуть використовуватися і як тренажери для підготовки оперативно-диспетчерського персоналу станцій.

4.4. Для одержання адекватної оцінки часу перебування транспортних одиниць на станціях необхідно моделювати усі операції технологічного процесу обробки з урахуванням їх послідовності, взаємної обумовленості, спеціалізації і кількості виконавців, а також законів розподілу часу виконання.

4.5. У моделях станцій обґрунтована доцільність імітації руху поїздів замість завдання постійних значень часу заняття маршрутів. Розроблені точна (на основі диференціальних рівнянь) і наближена моделі, у яких вибір режимів руху здійснюється з урахуванням показань світлофорів залізничної автоматики.

4.6. В якості моделі систем регулювання руху поїздів доцільне використання детермінованих скінченних автоматів. Розроблено методику синтезу таблиць виходів і переходів автоматів для пунктів пересічення і злиття ліній у розв'язках вузлів. Для станцій з великою кількістю світлофорів і рейкових кіл доцільна аналітична форма опису функціонування автоматів, яка базується на використанні бульових функцій.

5. Одержала подальший розвиток теорія моделювання руху об'єктів на станціях і підходах до них, а також на сортувальних гірках. Встановлено, що неперервна апроксимація профілю залізничних колій кубічними сплайнами дозволяє моделювати рух окремого об'єкта диференціальним рівнянням другого порядку, у якому незалежною змінною є час. Це забезпечує синхронізацію паралельних процесів при моделюванні руху потоку поїздів або розпуску составів і, крім того, дозволяє збільшити у 5 разів крок інтегрування при тій же точності обчислень.

6. Удосконалено теорію моделювання сортувального процесу на сортувальних гірках.

6.1. Визначена область припустимих режимів гальмування відчепа, конфігурація якої залежить від його ходових властивостей; знайдені закономірності розподілу у даній області енергетичної висоти, що погашається при гальмуванні. Встановлено, що оптимальний режим гальмування відчепа знаходиться на межі області; це дозволило у 2 рази скоротити розмірність задачі оптимізації режимів гальмування.

6.2. Отримано рішення задачі оптимізації режимів гальмування відцепів состава, що розформовується на гірці, за допомогою розробленого двоетапного методу, який базується на ідеях динамічного програмування. Метод дозволяє максимізувати мінімальний інтервал та забезпечує оптимальний розподіл решти інтервалів між відчепами состава на розділових елементах.

7. Розроблено теоретичні основи функціонального моделювання й оптимізації процесу формування багатогрупних составів.

7.1. Встановлено, що при формуванні доцільно використовувати початкове упорядкування вагонів состава. З цією метою розроблено алгоритм заміни дійсних номерів груп (призначень) логічними, що дозволяє в середньому у 2 рази скоротити кількість груп і за рахунок цього зменшити час формування.

7.2. Формалізацію схем формування составів для комбінаторного і запропонованого у дисертації розподільного методів доцільно виконувати з використанням, відповідно, фібоначчійової та позиційної систем числення.

7.3. Встановлено, що для більшості составів існує множина схем формування, що відрізняються тривалістю. Запропоновано статистичний метод пошуку раціональної схеми, який дозволяє на 20-35% скоротити час формування.

7.4. Встановлено, що найбільший вплив на час формування мають тип сортувального пристрою, а також кількість груп та вагонів у составі. Використання гірки дозволяє у 1,5-2,4 рази скоротити час формування. Отримані залежності можуть бути використані для удосконалення конструкції сортувальних пристроїв і технології формування составів.

#### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ За ТЕМОю ДИСЕРТАЦІЇ

1. Механизация и автоматизация формирования поездов / Ю.А. Муха, В.А. Король, Н.М. Иванков, А.М. Бледный, В.И. Бобровский; Под общей ред. Ю.А. Мухи. - К.: Техніка, 1987. - 136 с.
2. Бобровский В.И. Представление продольного профиля сортировочных горок в АСУ расформированием составов // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. - 1996. - №1, 2. - с. 19 - 25.
3. Бобровский В.И. Моделирование автоматизированных сортировочных горок // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. - 1996. - №3, 4. - с. 83 - 84.
4. Бобровский В.И. Дифференциальные уравнения движения отцепа и методы их решения // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. - 1996. - №6. - с. 34 - 39.
5. Бобровский В.И. Структурные модели путевого развития железнодорожных станций для автоматизированного проектирования // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. - 1997. - №3. - с. 58 - 63.
6. Бобровский В.И. Компьютерное моделирование в проектировании железнодорожных станций // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. - 1998. - № 4. - с. 68 - 69.
7. Бобровский В.И. Оценка расходов на передвижение поездов в проектируемых развязках железнодорожных линий с использованием имитационного моделирования. // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. - 1999. - №2. - с. 48 - 51.
8. Бобровский В.И. Поиск оптимальных режимов торможения на проектируемых сортировочных горках. // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. - 1999. - №5. - с. 50 - 54.
9. Бобровский В.И., Козаченко Д.Н. Информационные технологии в проектировании железнодорожных станций и узлов // Залізничний транспорт України. - 1999. - №6(15). - с. 6 - 10.
10. Бобровский В.И., Козаченко Д.Н. Расчет эксплуатационных расходов в задачах оптимизации продольного профиля железнодорожных станций // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 2000. - №2. - с. 14 - 19.
11. Бобровский В.И. Оптимизация формирования многогруппных составов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 2000. - №6. - с. 10 - 14.
12. Бобровский В.И., Вернигора Р. В. Функциональное моделирование железнодорожных станций в тренажерах оперативно-диспетчерского персонала // Математичне моделювання. - 2000. - №2(5). - с. 68-71.
13. Бобровский В.И. Эргатические модели сортировочных горок // Інформаційно-

- керуючі системи на залізничному транспорті. - 2001.- №5.- с. 7 - 11.
14. Аркатов В.С., Бобровский В.И., Муха Ю.А., Муратов А.А. Улучшение использования сортировочных путей при автоматизации роспуска // Железнодорожный транспорт. - 1983. - №11. - с. 20-22.
  15. Муха Ю.А., Бобровский В.И. Исследование влияния высоты сортировочной горки на качество прицельного регулирования // Вопросы механизации и автоматизации сортировочного процесса на железнодорожных станциях: Труды ДИИТа. - Вып. 168/9. - Днепропетровск. - 1975. - с. 39 - 54.
  16. Бобровский В.И. Определение вероятностей разделения отцепов на стрелках сортировочной горки // Вопросы механизации и автоматизации сортировочного процесса на станциях: Труды ДИИТа.-Вып.181/10.- Днепропетровск.-1976.-с. 56 - 63.
  17. Муха Ю.А., Бобровский В.И. Использование ЭВМ при расчете плана горочной горловины сортировочного парка // Применение вычислительной техники в учебном процессе: Труды вузов МПС. - Вып. 591. - М.: МИИТ, 1977. - с. 140 - 147.
  18. Бобровский В.И. Временной принцип моделирования скатывания отцепов с горки // Вопросы механизации и автоматизации сортировочного процесса на станциях: Межвуз. сб. научн. тр. - Вып. 197/12.-Днепропетровск: ДИИТ, 1978.- с. 50 - 58.
  19. Бобровский В.И., Муратов А.А. Об одном алгоритме управления интервальными тормозными позициями // Вопросы механизации и автоматизации сортировочного процесса на станциях: Межвуз. сб. научн. тр. - Вып. 216/14. - Днепропетровск: ДИИТ, 1981. - с. 29 - 36.
  20. Бобровский В.И., Горбачева И.А., Муратов А.А. Моделирование управляемого скатывания отцепов на автоматизированных сортировочных горках // Вопросы механизации и автоматизации сортировочного процесса на станциях: Межвуз. сб. научн. тр. - Вып. 229/15. - Днепропетровск: ДИИТ, 1983. - с. 22 - 29.
  21. Муха Ю.А., Бобровский В.И., Муратов А.А., Бондаренко В.Э. Об идентификации процесса скатывания отцепов с сортировочной горки // Вопросы проектирования и организации работы железнодорожных станций и узлов: Межвуз. сб. научн. тр. - Новосибирск: НИИЖТ, 1985. - с. 41 - 47.
  22. Бобровский В.И. Автоматизация проектирования стрелочных горловин сортировочных парков // Совершенствование технических устройств и технологии управления процессом расформирования составов на сортировочных горках: Межвуз. сб. научн. тр. - Днепропетровск: ДИИТ, 1986. - с. 42 - 49.
  23. Бобровский В.И. Автоматизация составления сортировочного листа при использовании комбинаторного метода сортировки вагонов // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на железнодорожных станциях: Межвуз. сб. научн. тр. - Днепропетровск: ДИИТ, 1990. - с. 60 - 69.
  24. Бобровский В.И. Моделирование системы управления пропуском поездов через пересечения // Концепція підвищення ефективності вантажних перевезень на залізничному транспорті: Міжвуз. зб. наук. пр. - Вип. 33. - Харків: ХарДАЗТ, 1998. -с. 71-79.
  25. Бобровский В.И. Имитационная модель развязки линий в железнодорожном узле // Концепція підвищення ефективності вантажних перевезень на залізничному транспорті: Міжвуз. зб. наук. пр. Вип. 38. - Харків: ХарДАЗТ, 1999. - с. 35 -

42.

26. Бобровский В.И. Оптимизация режимов торможения отцепов на сортировочных горках / Транспорт: Зб. наук. праць ДПТУ.- Дніпропетровськ: Арт-Пресс, 2000.- с. 43 - 47.

#### ДОДАТКОВІ ПРАЦІ

27. Бобровский В.И. Исследование влияния длины измерительного участка на скорость роспуска составов // Совершенствование технических устройств и технологии управления процессом расформирования составов на сортировочных горках: Межвуз. сб. научн. тр. - Днепропетровск: ДИИТ, 1986. - с. 50 - 59.
28. Бобровский В.И. Функциональное моделирование железнодорожных станций // Тези доповідей міждержавної конференції “Комп'ютерне моделювання”. - Дніпродзержинськ: ДДТУ, 1999. - с. 42-43.
29. Бобровский В.И. Вернигора Р.В. Функциональное моделирование в тренажерах оперативно-диспетчерского персонала железнодорожного транспорта // Тези доповідей міждержавної конференції “Комп'ютерне моделювання”. - Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2000. - с. 167-168.
30. Бобровский В.И. Временной принцип в имитационной модели процесса скатывания отцепов с сортировочной горки // Вопросы проектирования и технология транспортных узлов: Межвуз. сб. научн. тр. - Вып. 674. - М.: МИИТ, 1980. - с. 70-71.
31. Бобровский В.И., Горбачева И.А., Муратов А.А. Моделирование управляемого скатывания отцепов на автоматизированных сортировочных горках // Проблемы наращивания мощности станций и узлов: Межвуз. сб. научн. тр. - Вып. 765. - М.: МИИТ, 1985. - с. 55-56.
32. Бобровский В.И., Муратов А.А. Управление интервальными тормозными позициями на автоматизированных сортировочных горках // Совершенствование технологии перевозок и увеличение пропускной способности железных дорог: Межвуз. сб. научн. тр. - Вып. 736. - М.: МИИТ, 1983. - с. 12 - 14.
33. Бобровский В.И. Исследования и оптимизация режимов торможения отцепов на сортировочных горках. // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. - 1999. - № 4. - с. 86-87.
34. Бобровский В.И. Оптимизация режимов расформирования составов на сортировочных горках // Тези доповідей міждержавної конференції “Комп'ютерне моделювання”. - Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2000. - с. 165-166.
35. Бобровский В.И. Имитационное моделирование роспуска составов в тренажерах горочных операторов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 2001. - № 4. - с. 112.
36. Бобровский В.И. Интервальное регулирование скорости отцепов на сортировочных горках // Інформаційно - керуючі системи на залізничному транспорті. - 2002. - № 4, 5 (додаток). - с. 23.
37. Бобровский В.И., Козаченко Д.Н. Интегрированные модели железнодорожных станций // Інформаційно - керуючі системи на залізничному транспорті. - 2002. - № 4, 5 (додаток). - с. 23.
38. Бобровский В.И., Вернигора Р. В. Тренажеры для подготовки оперативно-диспетчерского персонала железнодорожных станций // Інформаційно - керуючі системи на залізничному транспорті. - 2002. - № 4, 5 (додаток). - с. 22-23.

## АННОТАЦИЯ

Бобровский В. И. Теоретические основы совершенствования конструкции и технологии работы железнодорожных станций. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.20 - эксплуатация и ремонт средств транспорта, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2002.

Диссертация посвящена проблеме совершенствования конструкции и технологии работы железнодорожных станций на основе их математического моделирования. В диссертации разработана интегрированная система структурно-параметрических и функциональных моделей для автоматизированного анализа и синтеза рациональной конструкции и технологии работы станций.

Структурно-параметрические модели отображают конструкцию путевого развития станций и используются для его синтеза. Они реализованы с использованием геометрических моделей станций, основанных на представлении их схем с помощью взвешенных ориентированных графов. Система геометрических моделей, используемых на отдельных этапах синтеза станции (входные, внутренние, выходные модели), позволяет осуществить графический ввод немасштабной схемы, автоматически выполнить ее топологический анализ и идентификацию отдельных элементов, расчет плана путевого развития, а также построение чертежей.

Функциональные модели используются для анализа станций и позволяют получить количественную оценку их эффективности, необходимую для поиска путей улучшения конструкции и технологии работы станций. Система функциональных моделей включает имитационные модели 4-х станционных подсистем: подходов к станциям, включая развязки линий, собственно станций или отдельных парков, сортировочных горок и районов формирования. Модели указанных подсистем построены с использованием системного подхода и имеют иерархическую структуру. На метауровне каждая подсистема станции рассматривается как многофазная, многоканальная управляемая система массового обслуживания потока заявок определенного типа. На макроуровне осуществляется моделирование соответствующей системы регулирования движения поездов и/или маневровых составов, а также моделирование обслуживания потоков заявок. На микроуровне выполняется имитационное моделирование перемещения отдельных единиц подвижного состава с использованием дифференциальных уравнений.

Разработанные функциональные модели построены как эргатические; в них человек принимает непосредственное участие в моделировании, выполняя функции оперативно-диспетчерского персонала.

Модель технологического процесса обслуживания отдельной заявки учитывает очередность всех выполняемых операций, их взаимную обусловленность, закон распределения времени выполнения, а также специализацию и число исполнителей. Базой данных для функциональных моделей служат геометрические модели станций, которые используются для имитационного моделирования перемещений подвижного состава, а также для создания информационных моделей, необходимых для участия человека в моделировании.

Разработанные основы теории функционального моделирования станций были использованы при создании моделей четырех базовых станционных подсистем. Функциональная модель подхода к станции включает развязки линий и служит для моделирования движения потоков поездов на примыкающих линиях и их пропуска через пункты пересечения. Она включает модель системы регулирования движения

поездов, побудовану на основі кінцевого автомата Мили.  
Функціональна модель станції (окремнього парку), призначена для імітації обслуговування поступаючих поездів. Розроблена методика формалізації технологічних процесів обробки поездів на базі структурно-часових таблиць операцій. Імітаційна модель переміщення об'єктів побудована на основі припущення про їх рівноускорене рух. Для перевірки вільності маршрутів руху створена модель системи ЕЦ, побудована на основі детермінованого кінцевого автомата; функціонування автомата описується сукупністю булевих функцій. До складу ергатическої моделі станції включена інформаційна модель, що дозволяє людині контролювати протікаючі процеси, приймати необхідні рішення і забезпечувати їх реалізацію. Отримала подальше розв'язання теорія сортировочної процесу; вдосконалена модель сортировочної горки на основі сплайн-апроксимації її профілю. Встановлено область допустимих режимів гальмування відцепів, визначено її закономірності. Розроблено новий двохетапний метод оптимізації режимів гальмування, заснований на ідеях динамічного програмування, що дозволяє максимізувати мінімальний інтервал між відцепами складу на роз'їзних елементах і найкращим чином розподілити інші інтервали. Розроблено теоретичні основи моделювання процесу формування багатогрупних складів, використані при створенні моделі підсистеми формування, встановлено основні фактори, що визначають час формування, розроблено методика формалізації процесу формування, запропоновано новий розподільчий метод формування. Розроблено статистичний метод оптимізації схеми формування, побудовано імітаційну модель для його реалізації. Розроблена сукупність моделей може бути покладена в основу автоматизованої системи підтримки прийняття рішень, що необхідна для оцінки і вибору раціонального комплексу заходів, спрямованих на вдосконалення конструкції і технології роботи залізничних станцій.

**Ключові слова:** станція, геометрична модель, функціональна модель, розв'язка ліній, сортировочна горка, формування складів, оптимізація.

#### АННОТАЦІЯ

Бобровський В. І. Теоретичні основи удосконалення конструкції і технології роботи залізничних станцій. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за фахом 05.22.20 - експлуатація і ремонт засобів транспорту, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна, Дніпропетровськ, 2002.

Дисертація присвячена проблемі удосконалення конструкції і технології роботи залізничних станцій на основі математичного моделювання. У дисертації розроблено інтегровану систему геометричних і функціональних моделей для аналізу і синтезу станцій. Геометричні моделі відображають конструкцію колійного розвитку станцій і використовуються для його синтезу. Функціональні моделі використовуються для аналізу станцій і дозволяють одержати оцінку їх ефективності, необхідну для пошуку шляхів поліпшення конструкції і технології станцій. Розроблено теоретичні основи і створено функціональні моделі основних станційних підсистем: парків станцій і підходів до них, сортувальних гірок і районів формування. Функціональні моделі здійснюють імітаційне моделювання підсистем; вони побудовані з використанням системного підходу і мають ієрархічну структуру.

Розроблена сукупність моделей може бути покладена в основу автоматизованої системи підтримки прийняття рішень для оцінки і вибору раціонального комплексу заходів, спрямованих на підвищення ефективності експлуатації станцій.

**Ключові слова:** станція, геометрична модель, функціональна модель, розв'язка ліній, сортувальна гірка, формування составів, оптимізація.

#### THE SUMMARY

Bobrovsky V.I. Fundamental theory of perfecting of a design and technology of railway stations. - Manuscript.

Thesis for awarding of a scientific doctor degree of the technical science on a speciality 05.22.20 - exploitation and repair of transport means. - Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Dnipropetrovsk, 2002.

The thesis is devoted to a problem of perfecting of a design and technology of railway stations on the basis of mathematical modelling. In a thesis the integrated system of geometrical and functional models for the analysis and synthesising of stations is designed. The geometrical models describe a design of yard track and will be used for its synthesising. The functional models will be used for the analysis of stations and allow to receive an estimation of their efficiency for looking up of paths improvement for a design and technology of stations. The fundamental theory are designed and the functional models of the basic subsystems of stations (station and approaches road, hump and formation yard) are created. The functional models execute simulation modelling of subsystems; they are built with usage of system approach and have an hierarchical structure.

The designed combination of models can be trusted to in the fundamentals of the automated decision support system for an estimation and selection of a rational complex of measures, directional on increase of efficiency of stations exploitation.

**Keywords:** railway station, geometrical model, functional model, decoupling of lines, hump, formation of trains, optimisation.

Бобровський Володимир Ілліч

#### ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЇ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТАНЦІЙ

Автореферат

Підписаний до друку \_\_\_\_\_.

Формат 60x84 1/16. Папір для множильних апаратів. Різограф.

Ум. др. арк. 2,0. Обл.- вид. л. 2,0. Тираж 100 екз.

Замовлення № \_\_\_\_\_. Безкоштовно.

Дніпропетровський національний  
університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

*Адреса університету і ділянки оперативної поліграфії:*

*49010, Дніпропетровськ, вул. Акад. В.А. Лазаряна, 2*