Мозолевич Григорій Якович

Кандидат технічних наук, доцент кафедри «Станції та вузли» факультету «Управління процесами перевезень», Голова Ради молодих вчених Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Коло наукових інтересів: системний аналіз транспортних процесів, оптимізація процесу пропуску потоків поїздів на залізничних напрямках, дослідження конструкції та технології роботи залізничних станцій, оптимізація параметрів поїздопотоків.

e-mail: MrMozG81@mail.ru

Чибісов Юрій Віталійович

Кандидат технічних наук, доцент кафедри «Станції та вузли» факультету «Управління процесами перевезень» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Коло наукових інтересів: вибір раціональних маршрутів пропуску поїздів у залізничному вузлі, оптимізація технології пропуску поїздів на мережі; оптимізація конструкції та технології роботи залізничних станцій.

e-mail: Chibisoff_yuriy@mail.ru

Монографія надрукована в рамках виконання Гранту Дніпропетровської обласної державної адміністрації для молодих вчених. Автори монографії виражають подяку за фінансову підтримку.

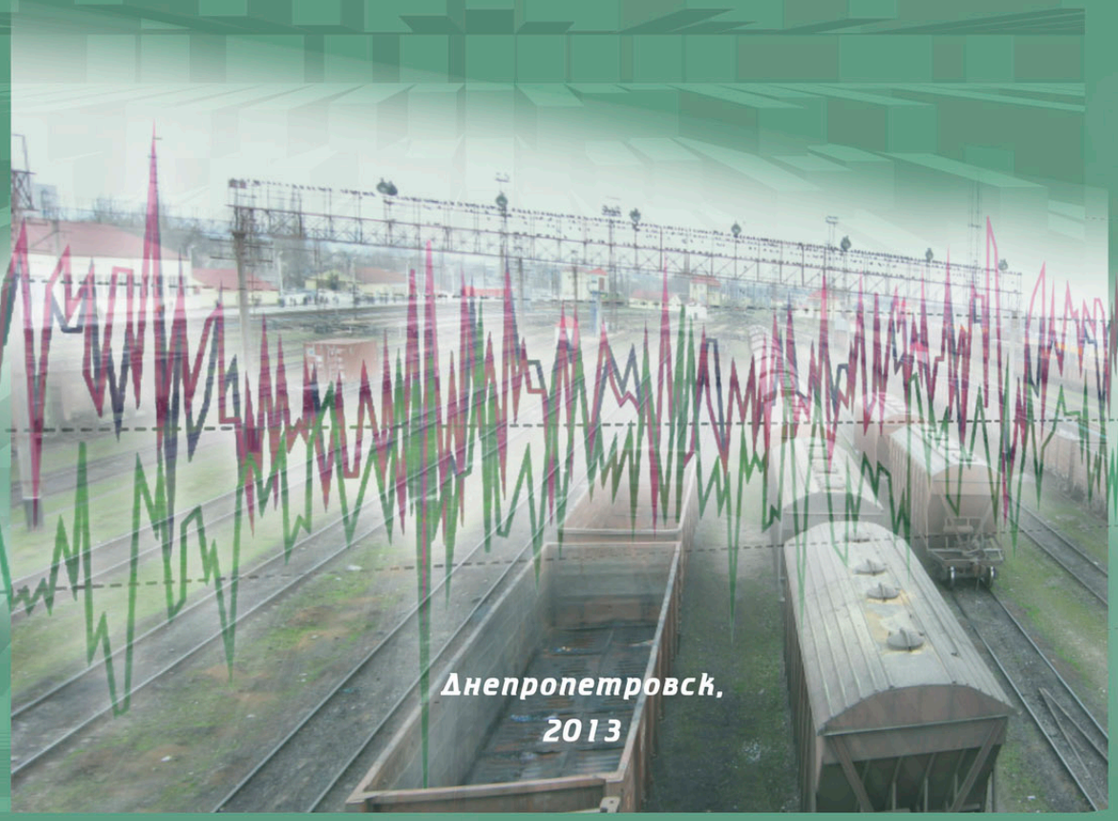
Мозолевич Г.Я.
Чибісов Ю. В.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА ЗАЛІЗНИЧНІЙ МЕРЕЖІ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Мозолевич Г.Я., Чибісов Ю. В.

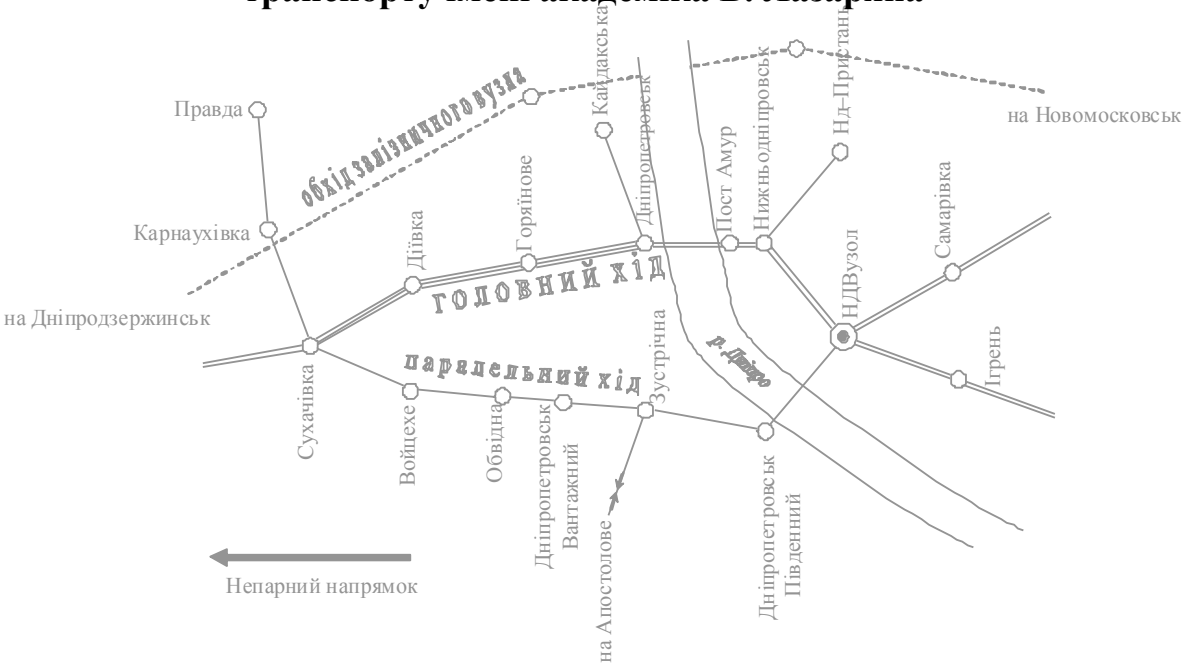
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА ЗАЛІЗНИЧНІЙ МЕРЕЖІ



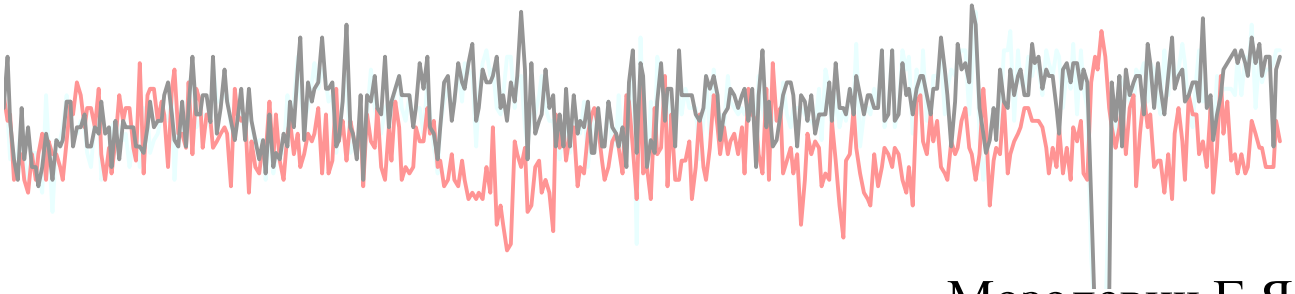
Днепропетровск,
2013

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна



ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА ЗАЛІЗНИЧНІЙ МЕРЕЖІ



Мозолевич Г.Я.

Чибісов Ю.В.

Дніпропетровськ

2013

Рекомендовано до друку рішенням Вченої Ради Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (протокол №9 від 29.04.2013 року)

Рецензенти:

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Транспортних технологій» Запорізького національного технічного університету **Бабушкін Геннадій Федерович**, Україна

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Транспортних систем та логістики» Української державної академії залізничного транспорту **Альошинський Євген Семенович**, м. Харків, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА ЗАЛІЗНИЧНІЙ МЕРЕЖІ: Монографія / Г.Я. Мозолевич, Ю.В. Чибісов – Дніпропетровськ: видавництво Маковецький, 2013

Монографія присвячена питанням організації вантажних перевезень на залізничному транспорті. Авторами вирішені актуальні задачі розподілу транспортних потоків та оптимізації їх параметрів. Монографія призначена для студентів, науково-педагогічних працівників ВНЗ, виробничників транспортної галузі.

ВСТУП

Сучасні умови функціонування залізничного транспорту України характеризуються постійною зміною структури та обсягів вантажо- та поїздопотоків при наявності резервів пропускної спроможності більшості дільниць залізничних напрямків. В зв'язку з цим зростає актуальність проблеми вибору раціональних параметрів маси та довжини поїздів з метою зменшення експлуатаційних витрат залізниці та витрат клієнтів як єдиної синергетичної системи. Залізничний транспорт України одночасно працює в ринкових умовах конкуренції з іншими видами транспорту, і в той же час, згідно закону України про транспорт, його головним завданням є своєчасне, повне і якісне задоволення потреб населення та суспільного виробництва в перевезеннях. При цьому залізничний транспорт виступає монополістом в масових перевезеннях видобувної, металургійної та хімічної промисловості. Тому його особливістю є значна частка витрат на утримання інфраструктури, що не залежить від обсягів роботи. Це визначає необхідність пошуку шляхів адаптації залізниць до наслідків коливань вантажопотоків та зміни їх структури.

Науково-практичні завдання розподілу транспортних потоків, визначення раціональних параметрів поїздопотоків є складними оптимізаційними задачами. В даній науковій праці авторами представлено свій погляд та підхід для вирішення цих актуальних задач.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОПУСКУ ПОЇЗДОПОТОКІВ НА ЗАЛІЗНИЧНИХ НАПРЯМКАХ

Однією з важливих задач функціонування залізничної галузі є вдосконалення системи управління експлуатаційною роботою. Залізничний транспорт є однією з найважливіших ланок в структурі переміщення товарів та сировини від джерела видобування та виробництва до кінцевого споживача. Рівень транспортного обслуговування на залізницях слід оцінювати за показниками перевізного процесу в цілому, з урахуванням якості управління рухом і формуванням поїздів, своєчасності виконання вантажних операцій, забезпечення поїздів локомотивами і локомотивними бригадами, обсягів ремонту рухомого складу, стану всіх технічних засобів тощо. В умовах стохастичного характеру обсягів вантажопотоків на залізничних напрямках, значних експлуатаційних витрат на утримання транспортної інфраструктури, підвищення вартості енергетичних ресурсів для підвищення ефективності роботи залізниць необхідно постійно удосконалювати технологію пропуску поїздопотоків на залізничних напрямках, яка буде направлена на зменшення витрат ресурсів, підвищення швидкості доставки вантажів, підвищення якості та ефективності транспортного обслуговування, а також забезпечення конкурентоспроможності залізниць на ринку транспортних перевезень.

Традиційно, з середини 30-х років минулого століття, вважали, що розробка системи організації вагонопотоків повинна включати до себе вирішення наступних чотирьох задач: визначення розмірів вантажних та порожніх вагонопотоків, складання плану маршрутизації з місць завантаження, розробку (розрахунок) плану формування вантажних поїздів усіх категорій на технічних станціях та методи оперативного регулювання вагонопотоків [1]. Але докорінна зміна економічних взаємовідношень підприємств транспорту між собою та з державою, розділення вагонного парку спочатку між самостійними державами, що виникли на території СРСР, а з часом – між окремими власниками в межах держави, і зміни обсягів виробництва, а, відповідно, обсягів вантажу, що пере-

возиться, конкуренція на ринку транспортних послуг з боку інших видів транспорту та транспортних організацій поставили перед залізничною галуззю ряд важких завдань.

Ці завдання розв'язувалися вченими та виробниками наступним чином. У роботах [2–5] викладені результати економічного ефекту від маршрутизації вагонопотоків, встановлено межі ефективності капіталовкладень у розвиток технічних станцій з метою підвищення рівня маршрутного відправлення вагонів. Також значний інтерес представляють результати дослідження впливу кількості колій під час реконструкції станції на організацію поїздопотоків [6].

Удосконалення організації вагоно- і поїздопотоків в значній мірі залежить від ефективного використання рухомого складу, тягових засобів, а також впровадження інформатизації галузі. У цій сфері уваги заслуговують роботи [7–10]. Так, в [9] запропоновано принцип удосконалення системи оцінки ефективності діяльності усіх залізничних підрозділів – забезпечення переходу від методу порівняння з результатами, що досягненні за минулий період, до оцінки співставленням фактичних результатів з прогнозними.

Ринкова економіка суттєво змінює вимоги до залізничного транспорту: зростає роль економічних критеріїв та збільшується динаміка економічних зв'язків. Щоб відповідати цій динаміці, залізничний транспорт повинен забезпечувати повноцінну економічну взаємодію постачальників та користувачів за рахунок управління вантажопотоками при раціональному використанні пропускної і переробної спроможностей інфраструктури [11–12]. Таким чином ринкова економіка потребує зміни технології перевезень, що тягне за собою зміну основних функцій управління перевезеннями та організаційних форм управління, корегування напрямків досліджень та психологічну перебудову як транспортників науковців, так і транспортників-виробничників.

Це ставить перед вченими задачу: як організувати технологію перевізного процесу [13], розуміючи під цим терміном весь комплекс операцій від планування і подачі порожніх вагонів під завантаження до їх транспортування у складі організованих поїздів. Адже при цьому елементами, що лімітують перевізний процес, можуть стати пропускні та перероблювальні спроможності діль-

ниць та станцій [14–15].

В роботі [16] багато уваги приділено проблемам дослідження пропускної спроможності, висвітлені крупномасштабні роботи з розвитку транспортних коридорів, комплексній реконструкції дільниць і станцій, організації важковагового руху та швидкісних пасажирських сполучень, направлених на підвищення ефективного використання пропускних спроможностей дільниць і станцій. В роботах [17–18] критикуються існуючі методи розрахунку пропускної спроможності дільниці та запропоновано нову методику, засновану на урахуванні нерівномірності надходження поїздів; також було досліджено вплив насичення дільниць поїздами на показники їх роботи.

При розрахунку потенційної пропускної спроможності транспортних мереж використовується також методологія Форда-Фалкерсона, заснована на рішенні задачі про максимальний потік [19], з використанням теорії графів. Особливість цього метода полягає в тому, що по кожній дільниці шляху, включаючи залізничні станції, задаються обмеження пропускної спроможності. Визначається варіант розподілу потоків за критерієм максимуму пропускної (провізної) спроможності мережі. Але такий спосіб розрахунку пропускної спроможності має і свої недоліки: по-перше, неможливо врахувати особливість перегону між двома станціями, по-друге, такий розрахунок передбачає однорідність вантажу і не враховує параметри поїздопотоків.

В області програмних систем багатокритеріальної оптимізації в сфері удосконалення технології пропуску поїздів велика увага у розглянутих джерелах приділяється питанням теорії графів [19–20]. Також велика увага приділена питанню шляхам (маршрутам) на графі. Залізнична мережа представляється як орієнтований кінцевий зв'язний граф з початковою та кінцевою вершинами. Для створення оптимальних умов функціонування залізничних дільниць необхідно регулювати їх насичення поїздами. Для вибору оптимального розподілу поїздопотоків на розгалужених полігонах розроблена методика, що заснована на теорії графів і потоків у мережах. Суть її полягає в тому, що схема колійного розвитку диспетчерського кола представляється у вигляді графа, на якому кожній дільниці приведена у відповідність її пропускна спроможність. За допомо-

гою цього графа можна не тільки визначити максимальну пропускну спроможність усього диспетчерського кола, але й вибрати раціональний варіант слідування поїздів в залежності від їх кількості на мережі. Але у такому випадку не враховується особливості перегону між двома сусідніми станціями. Це є суттєвим недоліком у визначенні раціональних маршрутів руху поїздопотоків.

У роботах [21–23] приділяється увага таким важливим аспектам перевізного процесу, як організація вагонопотоків на залізниці. Висвітлені можливі заходи щодо спеціалізації основних напрямків та перерозподілу маршрутів слідування вагоно- і поїздопотоків, а також подано приклад розв'язання задачі знаходження оптимального варіанта організації вагонопотоків методом лінійного цілочислового програмування.

Організація поїзної роботи на дільницях та напрямках потребує розробки оптимізаційних задач із відповідними критеріями оптимальності. Передусім, повинні бути впроваджені нові методи моделювання поїзної роботи [24–26]. Перехід на використання оперативних багатофакторних методів нормування значно підвищить об'єктивність моделювання операцій, що пов'язані з поїзною роботою. Так, ситуаційно-евристичний метод нормування, описаний в роботах [27–28] дозволяє виявити можливі ускладнення, що виникають у поїзній роботі. Їх пом'якшення чи ліквідація при поточному плануванні будуть здійснюватися за допомогою рішення оптимізаційних задач. При цьому рекомендуються використовувати такі критерії, як зменшення порожнього пробігу вагонів, скорочення затримок поїздів у період надання «вікон», відхилень від розкладів руху пасажирських поїздів, зменшення резервного пробігу локомотивів, підвищення дільничної та маршрутної швидкості руху поїздів, а також підвищення використання пропускної спроможності під час проведення ремонтних робіт.

Питанням підвищення та резервів пропускної та провізної спроможності приділена увага в роботах [29–31], в якій висвітлені не тільки проблеми неефективного використання інфраструктури залізничної галузі, але й недоліки у нормативно-правовій базі взаємовідносин між суб'єктами перевізного процесу.

Важливим питанням у створенні нових технологій управління перевізним процесом є перехід до автоматизації інтелектуальних функцій – аналізу ситуа-

ції, вибору оптимального рішення, розрахунку з використанням моделі складної системи [32–34]. Ефективна адаптивна технологія в динамічних ринкових умовах – це декілька варіантів організації перевезень для полігонів і вибір раціонального переходу між варіантами.

Питання підвищення якості оперативного планування експлуатаційної роботи, включаючи планування поїздоутворення на сортувальних станціях та забезпечення безперешкодного пропуску поїздів висвітлені в роботах [35–36] та мають важливе значення для вдосконалення системи управління перевезеннями. В роботі [37] розкриваються питання взаємодії служб перевезень та локомотивної з метою забезпечення своєчасного виводу поїздів із сортувальних станцій та підвищення ефективності використання локомотивних бригад.

Інноваційні напрямки розвитку залізничної галузі висвітлені в роботах [38–39]. В цих роботах приділена увага питанням автоматизації інтелектуальних функцій управління, автоматизації аналізу інформації та прогнозування, зроблено аналіз заходів, направлених на управління вагонопотоками, включаючи забезпечення виконання та корегування плану формування поїздів. Також акцент зроблено на інформаційному забезпеченні та вдосконаленні нормативної бази системи організації вагоно- і поїздопотоків.

Новітні технології управління поїздопотоками в транспортних вузлах з використанням логістичних центрів знайшли відображення в роботах [40–42], в яких висвітлені основні передумови створення логістичної системи на базі ОАО «РЖД», а також принцип її дії, направлений на раціональне використання існуючої інфраструктури усіх видів транспорту.

Моделям вибору стратегії надходження вагонопотоків у залізничному вузлі приділено увагу в роботі [43]. Запропонована модель надає можливість скоротити порожній пробіг і час знаходження в очікуванні вантажних операцій рухомого складу, а також експлуатаційні витрати на сортувальних станціях.

Для раціоналізації використання вагонів, скорочення обігу вагонів покращення якісних та кількісних показників роботи станцій необхідне планування составоутворення на сортувальних станціях проводити з урахуванням всіх експлуатаційних подій, що відбуваються на станціях вузла та прилеглих дільни-

цях.

Питанням моделювання транспортних процесів у залізничних вузлах приділена увага в роботах [44–46]. Так, в роботі [46] запропонована модель оперативного управління вантажними потоками залізничного вузла в термінах мереж Петрі з параметрами та затримками у часі. В цій роботі також розглянуто технологічний процес вантажної обробки поїздів у парках прийому, сортування та відправлення у залізничному вузлі. Питання дослідження процесу моделювання роботи залізничних вузлів розглядаються в роботах [47–48]. В роботі [49] виконано постановку задачі комплексного планування і управління перевезенням вантажів у транспортному вузлі та запропоновано метод її рішення.

Аналіз методів удосконалення технології пропуску поїздів на мережі залізниць та у межах залізничного вузла, показав, що переважна більшість цих методів не розглядають пропуск поїздів як складну багатокритеріальну задачу. Тому, з метою ліквідації цього недоліку та більш поглибленого вивчення технології перевезень у залізничних вузлах, необхідно застосовувати сучасні математичні методи аналізу транспортних систем.

В роботі [50] розглядаються питання, пов'язані з вибором рішень при наявності кількох критеріїв. Формулюється відомий принцип Еджворта-Парето і встановлюється, при виконанні яких умов застосування цього принципу виправдано. Розглянуто принципи вирішення багатокритеріальних задач при наявності кількісної інформації про відносну важливість критеріїв. Показується, що за допомогою запропонованого підходу, використовуючи лише кінцевий набір інформації про відносні важливості критеріїв, можна досить добре апроксимувати безліч потенційно-оптимальних рішень багатокритеріальної задачі. Детально описано алгоритм знаходження множини Парето та геометрія множини Парето у випадку двох критеріїв. Також розглянуто більш глибоке використання інформації про відносну важливість критеріїв для звуження множини Парето.

В роботі [51] описано застосування принципу Парето. Суть принципу полягає в знаходженні області компромісів, в якій поліпшення якості рішення з одним локальним критерієм призводить до погіршення якості рішення з іншим.

Розроблено евристичні схеми отримання області компромісу – принципи рівномірності, справедливої похибки, виділення одного оптимізаційного критерію і т. і. Для прийняття рішень у багатокритеріальних системах використовується метод Соболя-Статнікова, якому присвячена частина праці.

Монографія [52] присвячена розгляду оптимальних рішень за Парето, що відіграють важливу роль при аналізі багатокритеріальних задач прийняття рішень. У ній розбирається змістовний сенс, теоретичне і практичне значення поняття оптимального за Парето (ефективного) рішення, докладно розглядаються різного роду умови оптимальності, досліджуються структура і властивості множини Парето, викладається теорія подвійності багатокритеріальних завдань; обговорюються питання побудови множини Парето та перевірки оптимальності рішень.

В роботі [53] описано проблеми багатокритеріальної оптимізації, які обумовлені низкою труднощів концептуального характеру, а головний з них – вибір принципу оптимальності. Виконано дослідження та аналіз цієї проблеми, побудова принципів оптимальності, розв'язання багатокритеріальних (векторних) задач оптимізації та розробка на їх основі конструктивних методів. В даній роботі розглянуто та сформульовано аксіоми рівності, рівнозначності і пріоритету критеріїв у векторних завданнях (опуклих) математичного програмування, на основі яких розроблені конструктивні методи розв'язання задач векторної оптимізації, та досліджено деякі теоретичні питання рішення задач. Розглянуто та досліджено комплекс моделей, в основі яких лежать завдання векторної оптимізації, в тому числі моделі багаторівневих ієрархічних систем, а також інші моделі прийняття рішень за багатьма критеріями.

У роботі [54] описані поняття і методи, які визначають процеси прийняття рішень, а також інструменти їх обґрунтування і підтримки, зокрема множини Парето. Наведені приклади типових задач прийняття рішення та їх покрокове розв’язання. Висвітлюються аксіоматичні теорії раціональної поведінки, багатокритеріальні рішення на об'єктивних моделях, особливості переробки інформації людиною у зв'язку з прийняттям рішень. Розкриваються сучасні підходи до побудови експертних баз даних, аналізу та прийняття рішень, діяльності

консультативних фірм і консультантів з проблем прийняття рішень. Велика увага приділена методам оцінки та порівняння багатокритеріальних альтернатив.

У статі [55] розглядаються питання, пов'язані з проблемою багатокритеріальної оптимізації, сформованою італійським економістом В. Парето. Формальне її вирішення – це знаходження оптимального функціонування системи F, направленого на виконання цілей по частковим критеріям f_k. Описано множину точок, оптимальних за Парето. Розглянуто геометричну інтерпретацію цієї множини в одно-, дво- та багатовимірному просторі. Наведені прості приклади багатокритеріальних задач з різними умовами на мінімізацію/максимізацію суми відстаней між трьома містами і різними видами конфігурації області обмежень. Формалізована постановка цих задач та описаний покроковий алгоритм їх вирішення.

Ще одним ефективним способом дослідження процесів пропуску вагонота поїздопотоків на залізничних напрямках є аналітичне та імітаційне моделювання. Оскільки залізничні дільниці є складними динамічними системами, то моделювання їх роботи є ефективним засобом вирішення складних задач, що виникають в процесі управління. Питанням моделювання роботи залізничних ліній приділялася увага в роботах [56–58].

В роботі [59] запропонована методика аналітичного моделювання залізничних ліній із застосування теорії графів та керованих марковських ланцюгів. У даній роботі станція представлена двома підсистемами: підсистема розформування та підсистема формування. Множина можливих переходів підсистеми від одного стану до іншого представлена у вигляді орієнтованого графу. Вершинами графу є різні стани, а дуги – переходи. На базі даного графу складається таблиця ймовірностей станів, на основі якої будуються номограми залежності станів. Далі пропонується їх використання для визначення оптимального режиму роботи сортувальної станції. Недоліком даного підходу є необхідність високого рівню підготовки людини, що виконує дослідження та складність в сукупності із значними витратами часу для побудови номограм різних транспортних об'єктів, ймовірнісний характер розрахунків.

Метод моделювання станцій, заснований на використанні математичного апарата марковських випадкових процесів, представлений в роботі [60], в якій станція розглядається як багатофазна одноканальна система масового обслуговування (СМО). Для станції будується орієнтований граф станів СМО, на базі якого складається система рівнянь Колмогорова для граничних ймовірностей окремих її станів. Отримані ймовірності дозволяють визначити основні техніко-технологічні параметри станції, необхідні для оптимізації її потужності. Даний метод досить ефективний, однак його складність різко зростає при переході до багатоканальних СМО та збільшенні числа колій станцій.

Значними проблемами моделювання транспортних процесів є формування транспортних потоків і структури постійних пристроїв. В [61] показано, що найпростіший потік, яким найчастіше оперує апарат теорії масового обслуговування, не завжди може адекватно описати реальні транспортні потоки. При моделюванні необхідно враховувати неоднорідність і динамічність транспортних потоків, властиву їм нерівномірність. Аналітичні формули для розрахунку простоїв транспортних засобів в очікуванні технологічних операцій недостатньо враховують технічне оснащення станції та їх технологію, тому останнім часом інтенсивно розвиваються методи імітаційного моделювання роботи станцій.

Для вирішення зазначених задач використовується імітаційне моделювання, що є потужним засобом вирішення проблем, які неможливо вирішити аналітично. Його властивості широко розкриті в роботах [61–63]. У зв’язку з тим, що при реалізації цього методу збирається значний обсяг інформації про об’єкт дослідження, з'являється можливість виконання детального аналізу явищ та проникнення в сутність процесу, що неможливо при звичайному натурному досліді. Реальність виконання таких експериментів на імітаційних моделях при неможливості проведення на існуючих напрямках залізниць; можливість прогнозування та аналізу різноманітних ситуацій, що можуть виникнути в майбутньому, але ще не виникали на практиці; довготривалі явища та процеси в реальній системі можуть бути проаналізовані за короткий проміжок часу; можливість оцінити значимість окремих параметрів, що полегшує створення теоретичних моделей, – все це є беззаперечними перевагами імітаційного моделюван-

ня. Головним недоліком методу є складність реалізації та витрати часу.

В залежності від задач, що досліджуються в роботі залізничних ліній, імітаційні моделі можна розділити на три категорії [56]: ті, що представляють рух окремих поїздів (мікромоделі), рух групи з декількох поїздів (макромоделі); ті, що розглядають потік поїздів на розгалуженій мережі залізниць (сітьові моделі). В мікромоделі з допомогою точних методів досліджується індивідуальна поведінка поїздів. В цьому випадку поїзди розглядаються у вільному русі [63]. Прикладом такої моделі є виконання тягових розрахунків на ЕОМ. В макроскопічній моделі досліджуються середні характеристики руху великої кількості поїздів на дільниці. Таке моделювання дозволяє розглядати комплекс «потік поїздів – машиніст – дільниця». Сітьові моделі охоплюють широкий клас задач при проектуванні будівництва та реконструкції, плануванні перевізної роботи та експлуатації залізниць.

Ще одним фактором, що впливає на точність моделі, є коректність врахування випадкових факторів [64]. Це, в першу чергу, стосується мікромоделей. Якщо ліквідувати в них елементи випадковості, вони починають працювати аналогічно сітьовій моделі. І навпаки, досліджуючи макромодель або сітьову, можна до деякої міри ігнорувати випадкові фактори, оскільки вони вже увійшли в ці моделі в усередненому вигляді.

В [65] розроблено універсальний алгоритм моделювання, що дозволяє вирішувати задачі різного характеру й масштабу – від розрахунку пропускної спроможності перегону до станції в цілому. У результаті моделювання визначаються пропускна й перероблювальна спроможність системи, потужність технічних засобів, техніко-експлуатаційні показники. Метою моделювання є дослідження варіантів схеми та технології роботи об’єкта при заданому потоці поїздів, спрямоване на виявлення елементів, що лімітують його роботу, і черговості посилення технічного оснащення при збільшення обсягів роботи. При цьому з урахуванням взаємодії всіх вирішальних елементів станції й технологічного процесу одночасно визначається число колій, маневрових локомотивів, сортувальних пристроїв, тощо.

Для визначення пропускної спроможності транспортних систем в роботі

[66] розроблена методика побудови імітаційних моделей. Транспортний об'єкт в роботі представляється формалізованим описом його постійних пристроїв, змінних засобів і системи оперативного керування роботою. Постійні пристрої та змінні засоби представляються багатоканальними елементами із числом каналів $k \in (1; n_j)$.

Для моделювання роботи транспортних систем досить широко використається апарат мереж Петрі [67]. Використання цього апарату скорочує витрати часу на розробку моделей транспортних об'єктів а також спрощує процес їх створення, і в подальшому призначений для покращення якості перевізного процесу, скорочення строків доставки вантажів і, тим самим, для підвищення конкурентоспроможності залізниць. Зокрема, в роботах [68–69] розглядаються можливості використання апарата мереж Петрі для моделювання сортувальних станцій та інших транспортних комплексів. В цих працях розроблена методика подання комплексу "сортувальна станція – примикаючи дільниці" у вигляді мережі Петрі, у якій переходи імітують обробку об'єктів протягом заданого часу, а позиції характеризують стан системи й визначають умови переходів. При виконанні умов перехід спрацьовує, у результаті чого змінюється поточна розмітка мережі. У даних роботах показано, що ускладненням структури мережі можна досягти будь-якого ступеня деталізації системи. Передбачена також можливість моделювання випадкових інтервалів та тривалостей обслуговування транспортних об’єктів. Моделі, побудовані на основі мереж Петрі, дозволяють фіксувати стан системи в довільний момент часу, і за результатами моделювання визначити інтегральні показники тривалості виконання окремих операцій і число оброблених об'єктів. Як недолік, слід зазначити відсутність у моделі механізму вибору черговості виконання окремих операцій при виникненні конфліктних ситуацій. Зазначений механізм є у всіх керованих системах масового обслуговування, до яких відносяться транспортні комплекси. Також у моделі на базі мережі Петрі важко імітувати рух транспортних об'єктів для розрахунку витрат, пов'язаних з їх переміщенням.

Однією з основних проблем, що виникають при функціональному моде-

люванні роботи станцій та дільниць, є складність формалізації технологічних процесів обробки поїздів, які можуть суттєво відрізнятися для різних категорій поїздів, і в тому числі для різних елементів транспортних систем. Для полегшення й спрощення підготовки до моделювання в ДНУЗТ виконано комплекс робіт, що пов'язані з розробкою методики подання технології виконання основних операцій обробки поїздів та технічного оснащення станцій. Так для формалізації технологічного процесу обробки поїзда в [70] пропонується використовувати структурно-часову таблицю комплексу робіт, а в [71] формалізація технологічних процесів обробки об'єктів здійснюється з використанням детермінованого кінцевого автомата, який забезпечує виконання з кожним об'єктом всього комплексу технологічних операцій відповідно до їх взаємної обумовленості. Для врахування впливу оперативно-диспетчерського персоналу в [71] запропоновано концепцію ергатичних моделей станцій, в яких людина бере безпосередню участь в процесі моделювання і управляє технологічним процесом станції. Використання такого роду моделей дозволяє вирішувати широке коло прикладних задач, направлених на вдосконалення роботи залізничних станцій.

Отже, розроблені моделі дозволяють адекватно моделювати технологічні процеси станцій, але необхідним є подальше їх удосконалення з метою спрощення і прискорення їх побудови, а також спрощення аналізу результатів їх роботи.

Важливу роль у вивченні впливу випадкових факторів на поїзну роботу відіграє моделювання руху поїздів [56]. Така модель повинна відобразити роботу перегонів, дільниць, ліній, напрямків та може бути використана з метою дослідження, аналізу, прогнозування та управління рухом поїздів. Модель може допомогти з’ясувати, яким чином довжина поїздів та блок-дільниць, профіль колії та інші фактори впливають на швидкість руху поїздів, міжпоїзний інтервал та на пропускну спроможність в цілому.

Модель діючої дільниці, напрямку, полігону може мати велике значення при розвитку мережі залізниць та плануванні експлуатаційної роботи. Тому у [56] піднімається питання необхідності створення моделі, що представляє реальну картину потоку поїздів та доступну для системного аналізу. Це дозволить

знайти ефективні концепції управління рухом поїздів та отримати можливість прогнозувати показники роботи залізниць.

Немає сенсу створювати модель, яка точно відтворює всі деталі, оскільки це призводить лише до ускладнення процесу її створення [64]. Тому при моделюванні використовують ряд апроксимацій реальних характеристик руху поїздів. Якісна модель повинна бути одночасно і точною, і простою. Але такі моделі складно створювати у випадку великої та складної системи, якою є мережа залізниць [61]. Тому при дослідженні характеристик залізничної системи в цілому доцільно використовувати спрощені моделі, в яких вводяться апроксимації. У той же час при детальному дослідженні ізольованих дільниць мережі використовується точна модель, в якій зв'язки даної дільниці з іншими спрощуються та детально досліджується тільки ця дільниця.

У зв'язку з тим, що кожен поїзд на дільниці є дискретним та випадковим елементом, при моделюванні використовують мікромоделі [62], що досліджують індивідуальну поведінку кожного з поїздів за допомогою точних методів: наприклад, при тягових розрахунках, аналізі процесу «слідування за лідером» чи забезпеченні безпеки руху поїздів. Але такі моделі складно використовувати для дослідження великих мереж залізниць, що складаються із значної кількості дільниць. В цьому випадку доцільно використовувати макромоделі [62], що представляють середні характеристики великої кількості поїздів спрощеними методами.

При організації руху поїздів в якості кінцевої мети можуть бути [61]: досягнення найкращого значення заданої функції; виконання розмірів руху поїздів у заданий момент часу при мінімумі витрат; виконання заданої задачі у випадку використання фіксованої жорсткої програми функціонування технічних засобів; взаємодія дільниці, що досліджується, з роботою станцій та сусідніх дільниць для досягнення найвищої ефективності з точки зору експлуатації напрямку чи полігону. Якщо вирішується тільки питання досягнення найкращого значення заданої цільової функції, то від організації руху поїздів вимагається, принаймні, забезпечення ефективного функціонування дільниці.

Для моделювання руху поїздів використовують сучасні ЕОМ. Але іміта-

ційне моделювання потоку поїздів не є простою задачею у зв'язку зі складністю системи та неможливістю врахування всіх факторів, що на неї діють. Тому для того, щоб вирішити деяку задачу методом моделювання, рекомендують звузити як її постановку, так і масштаби моделі [63]. Тим не менш, техніка імітаційного моделювання на ЕОМ дозволяє мати справу з більш детальними моделями, ніж аналітичні методи. Розвиток процесу імітування руху поїздів на дільницях йшов від представлення поїзду як матеріальної точки до гнучкого стриженя або сукупності взаємодіючих окремих одиниць рухомого складу.

У відповідності з [61], при побудові моделі руху поїздів рекомендовано використовувати змінні, значення яких достатньо легко отримати із виконаних графіків руху та швидкостемірних стрічок локомотивів, але, наприклад, дільнична швидкість, міжпоїзні інтервали, ступінь використання розкладу графіка руху та ін. схильні до коливань. Тоді для визначення, наприклад, міжпоїзних інтервалів I, моделюють таку випадкову величину ξ, математичне очікування якої M[ξ] дорівнює величині I. При цьому M[ξ] оцінюють як середнє арифметичне n реалізацій випадкової величини ξ. Центральна гранична теорема при досить широких пропозиціях відносно ξ гарантує асимптотичну нормальність розподілення середньоарифметичного $I_n = \frac{1}{n} \cdot \sum_{s=1}^{n} \xi_i$.

Похибка оцінки I_n не перевершує із заданою ймовірністю величини $C\sqrt{\frac{D[\xi]}{n}}$, де D[ξ] – дисперсія випадкової величини ξ, а C – константа, що визначається ймовірністю помилки (рівнем достовірності оцінки). При використанні метода статистичних випробувань моделюють нормально розподілену випадкову величину, і задача полягає в обчисленні параметрів нормального розподілення.

Задачі, пов'язані з рухом поїздів, відносяться до класу задач масового обслуговування [72–73], наприклад, відправлення поїздів з технічних станцій, слідування по дільницям, прийом на станції пов'язані з очікуванням поїздів у чергах. У цих процесах можна відмітити деякі загальні для них особливості. Поїзди, що очікують відправлення, пропуску чи прибуття, на станції надходять

у визначеному порядку. Можливі випадки, коли відбувається процес накопичення поїздів з виникненням черги і неминучим очікуванням. Це призводить до зниження дільничної швидкості, ускладнення в регулюванні локомотивним парком тощо.

Таким чином, моделювання руху поїздів на дільницях при побудові імітаційних моделей є неоднозначною задачею, що може вирішуватись з різною ступеню деталізації фізичних процесів. Вона повинна визначатись в залежності від задач, що повинні вирішувати передбачені моделі в межах збереження адекватності їх роботи реальним транспортним об’єктам.

Одним із головних параметрів, що характеризує не тільки кількісну, але і якісну сторону роботи залізниць, є маса вантажних поїздів. Маса поїзда визначає розміри руху, необхідну потужність локомотивів і корисну довжину приймально-відправних колій. З масою поїзда пов’язана наявна провізна і пропускна спроможність залізничних ліній, швидкість доставки вантажів, потреба у вагонному і локомотивному парках для освоєння заданого обсягу перевезень [74].

Проблемі вибору найвигідніших значень маси вантажних поїздів присвячені роботи [75–76], які розкривають питання вибору раціональних норм маси, довжини станційних прийомо-відправних колій і необхідної потужності тягових засобів на перспективу; роботи [77–78] присвячені встановленню взаємозв'язку норм маси з експлуатаційно-економічними показниками роботи напрямків і вибору уніфікованих норм маси поїздів. У роботах [79–81] досить докладно досліджені питання техніко-економічної ефективності підвищення норм маси вантажних поїздів кратною тягою (шляхом секціонування електровозів і тепловозів різних типів в голові поїздів або застосуванням підштовхування). В цих роботах виконується дослідження оптимального рівня норм маси поїздів при заданому типі локомотива та довжині станційних колій, вплив норм маси поїздів на вибір оптимальної довжини дільниць обігу локомотивів, проблема вибору оптимальних норм маси передаточних поїздів у вузлах. Методика вибору найвигідніших норм маси вантажних поїздів у поточних експлуатаційних умовах і нормативи таких розрахунків наведені в роботах [82–83] про методику та систему техніко-економічних розрахунків в експлуатації залізниць.

Всі пропозиції по дослідженню оптимального узгодження маси й швидкості вантажних поїздів у наукових працях згаданих авторів можна розбити на три категорії [84]:

1) визначення маси состава й швидкості руху на керівному підйомі на основі паспортної характеристики локомотива;

2) вибір оптимального сполучення маси состава й швидкості руху на найважчому перегоні дільниці, що визначає пропускну здатність за принципом досягнення максимальної провізної спроможності;

3) вибір маси состава та швидкості руху на керівному підйомі по дільниці, виходячи із принципу найменшої собівартості перевезень.

Маса поїздів на залізницях України (УЗ) обмежується двома параметрами – довжиною приймально-відправних колій та силою тяги локомотива [85–87].

Проблема раціоналізації маси составів поїздів розглядається в роботі [88]. В ній запропоновано розв’язання задачі встановлення раціональної маси составів як за технологічним критерієм, так і за економічним.

Проблема вибору оптимального значення маси поїзда також підіймається в [89]. Припускається, що для прискорення строку доставки та збереження конкурентоспроможності залізниць необхідно буде формувати поїзди меншої маси, основою чого є значно знижені обсяги вантажопотоків на залізницях України [90].

Відомо, що з ростом маси зростають витрати на накопичення составів. З іншого боку, знижується пропускна спроможність дільниць та витрати на оплату праці локомотивних бригад. Згідно [87] раціональний по сумі витрат рівень маси вантажних поїздів залежить від дальності їх слідування, при чому ефект від підвищення маси поїзда тим помітніший, чим потужніші вантажопотоки та більша дальність слідування локомотивів.

В [91] пропонується методика визначення оптимальної маси поїзда з урахуванням часу його формування, приймаючи за критерій мінімум прямих експлуатаційних витрат при заданому рівні технічного використання локомотивів.

Задача визначення маси та довжини поїзда з метою встановлення оптимальної норми составу поїзда розв’язується в [89], при цьому був обраний крите-

рій, виражений в приведених вагоно-годинах, які враховують витрати локомотиво-годин та енергетичні через коефіцієнти приведення.

Важливе значення при рішенні задачі вибору раціональної норми маси поїздів має термін доставки. Час на доставку вантажу, який забезпечує конкурентоспроможність залізничних перевезень, в роботі [90] запропоновано визначати як допустиму тривалість знаходження вантажу в межах даної дільниці. Запропонований у [92] підхід відповідає прагненню формувати повносоставні та повновагові поїзди, а також надає можливості визначення раціонального ряду потужностей локомотивів і створення відповідного парку.

Обіг поїздів підвищеної маси та довжини призводить до подовження приймально-відправних колій, модернізації та підсилення пристроїв тягового енергозабезпечення та засобів СЦБ [93–94].

Для реалізації програми зростання середньої маси та довжини поїзда при дефіциті довжини приймально-відправних колій на станціях розробляються нові технології формування, обробки та пропуску таких поїздів [95]. При цьому використовується принцип системного підходу. Особлива увага надається формуванню поїздів підвищеної довжини: розроблена програма та методика проведення дослідних поїздок динамометричного вагона в поїздах підвищеної маси та довжини, яка дозволяє кожній локомотивній бригаді вести такі поїзда в режимах, найбільш близьких до раціональних, з найменшими витратами часу та ресурсів.

У роботах [96–97] на основі аналізу причин пошкодження автозчіпних пристроїв рухомого складу поїздів підвищеної маси і довжини показані найбільш імовірні причини порушення безпеки руху поїздів. Представлені шляхи підвищення безпеки руху і причини додаткового опору руху поїзда.

Таким чином, для розробки методів формування раціональної технології пропуску потоків вантажних поїздів на залізничних напрямках, залежно від часу руху та витрат енергетичних ресурсів, необхідна побудова адекватних математичних моделей технологічних процесів роботи залізничних станцій та напрямків і розробка методів техніко-експлуатаційної та техніко-економічної оцінки вибору параметрів поїздопотоків. Вирішення поставлених задач дозволить

отримати рекомендації щодо раціональної технології пропуску поїздів на полігонах, параметрів поїздопотоків, внаслідок чого зменшити енергетичні витрати на транспортування вантажів, а також витрати клієнтів-підпримств на транспортну складову. Це дозволить зменшити собівартість продукції та підвищити конкурентоспроможність продукції підприємств.

РОЗДІЛ 2
АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАНТАЖО- ТА ПОЇЗДОПОТОКІВ У ЗАЛІЗНИЧНИХ ВУЗЛАХ ТА НА ЗАЛІЗНИЧНИХ НАПРЯМКАХ

Теорії транспортних потоків розроблялися представниками двох груп вчених: математиками, які на транспорті знаходили можливості кількісної оцінки функціонування систем та вченими-транспортниками, які вивчали теорію потоків для вирішення прикладних задач [61]. Тому і виникло два напрямки розвитку теорії, один з яких базується на ідеях лінійного програмування та теорії графів, інший закладає в основу апарат теорії ймовірностей і математичної статистики. Більш детально з ними можна ознайомитися в роботах [19, 72, 99].

Вміння раціонально розподіляти потоки поїздів як у межах залізничного вузла, так і на мережі залізниць в цілому, дозволить вирішити низку питань, пов'язаних з тривалістю доставки вантажів, обмеженням пропускної спроможності залізничних ліній, зменшенням експлуатаційних витрат. В сучасних умовах питання дослідження закономірностей зміни експлуатаційних витрат та собівартості вантажних перевезень на мережі залізниць в залежності від обсягів роботи та розмірів руху залишається актуальним.

Інформація про раціональні маршрути руху поїздопотоків за критеріями тривалості руху та вартості пропуску поїздів може бути корисною для оперативного диспетчерського персоналу залізниць. Організація руху з урахуванням даної інформації дозволить зменшити витрати механічної роботи на переміщення рухомого складу та зменшити тривалість доставки вантажів.

Реалізація задачі визначення раціональних маршрутів руху поїздів для заданої мережі залізниць неможлива без аналізу характеристик поїздопотоків, а також параметрів одиниць потоку, характеру їх розподілу та принципу організації перевезень. В даному розділі поставлена задача вивчення характеристик поїздопотоків у залізничних вузлах та на залізничних напрямках статистичними методами для подальшого використання їх в моделі розподілу поїздопотоків на мережі (в тому числі у залізничному вузлі), імітаційній моделі залізничного напрямку з метою дослідження технології перевезень.

2.1. Послідовність та методи проведення досліджень

Залізничний напрямок представляє собою складну, динамічну, стохастичну, ергатичну систему. Цілями даної системи є забезпечення перевезень вантажо- та поїздопотоків із заданою маршрутною швидкістю з мінімальними експлуатаційними витратами та при безумовному дотриманні безпеки руху. Залізничному напрямку як системі властива багатакомпонентність, багатокритеріальність, високий динамізм поведінки [117, 118].

Підсистемами залізничного напрямку є технічні станції та залізничні дільниці, елементами виступають колії перегонів, приймально-відправних та сортувальних парків станцій, горловини станцій, поїзди, локомотиви, вагони, працівники тощо. Підсистеми окремого залізничного напрямку, як і різні напрямки, поєднані між собою множиною прямих та зворотних зв'язків, що змінюються у часі. Між елементами системи мають місце фізичні та інформаційні зв'язки. Стан системи характеризується положенням та станом її окремих елементів у просторі та часі. Входом та виходом системи «залізничний напрямок» постає поїздопотік із та на суміжні напрямки. Поведінка цієї системи обумовлюється в основному впливом системи управління та значно залежить від обсягів та вхідних поїздопотоків.

Під час пропуску по напрямку вагонопотоки проходять ряд фаз обслуговування. В залежності від структури напрямку це фази переробки потоків на сортувальних та дільничних станціях, пропуску потоків по залізничним дільницям. Кількість дільниць та станцій переробки на напрямку може коливатися в широких межах в залежності від його довжини.

Для проведення дослідження та підвищення ефективності роботи залізничних напрямків за рахунок визначення раціональних параметрів поїздопотоків необхідно використовувати системний підхід. Тому при побудові моделі системи «залізничний напрямок» виконано її декомпозицію: модель залізничного напрямку поділяється на моделі технічних станцій та дільниць. Для кожної моделі характерні свої задачі та методи дослідження, при цьому вихідні дані на нижчому рівні є вхідними даними для вищого рівня.

На мікрорівні об’єктом дослідження є процес переробки транзитних вагонопотоків та формування поїздопотоків на сортувальних та дільничних станціях напрямку з технологією формування поїздів з різними параметрами ваги та довжини. Для визначення тривалості проведення операцій використано існуючі методики їх розрахунку та проведено хронометраж операцій на реальних залізничних об’єктах – станціях Нижньодніпровськ-Вузол, Джанкой, ряді залізничних дільниць. При виконанні дослідження використовуються методи математичної статистики, планування факторних експериментів, імітаційного моделювання тощо. Також на мікрорівні вивчаються характеристики існуючих поїздопотоків на в розрізах залізничних напрямків (на перегонах та станціях). Задачами дослідження є виявлення закономірностей між параметрами поїздопотоків та експлуатаційними показниками станцій.

На макрорівні об’єктом дослідження є процес пропуску поїздопотоків по залізничному напрямку, що являє собою систему масового обслуговування (СМО), окремими фазами якої є станції та дільниці. Тому зміна обсягів вагоно- та поїздопотоків, їх параметрів, технології переробки впливає на завантаження залізничних об’єктів та виконавців, на міжопераційні простої та тривалість знаходження рухомого складу в окремих фазах обробки та в СМО взагалі, і відповідно на експлуатаційні витрати залізниць [119]. Задачами дослідження на цьому рівні є побудова адекватних функціональних моделей залізничних напрямків для визначення техніко-експлуатаційних показників їх роботи. Основними методами дослідження є методи імітаційного моделювання, теорія скінченних автоматів та тягові розрахунки.

На метарівні об’єктом дослідження є процес перевезень вантажів в цілому. Економічна ситуація в країні та світі повинна впливати не тільки на умови та обсяги роботи промислових підприємств, а і на технологію їх обслуговування підприємствами транспорту в плані швидкості доставки вантажів, собівартості перевезень та ін. Оскільки залізниці мають значні витрати на утримання власної інфраструктури, то перед ними постає проблема адаптації до поведінки зовнішнього середовища. Зміна маси та довжини составів, що формуються на технічних станціях, впливає на тривалість доставки вантажів та експлуатаційні

витрати залізниці. Тому адаптація параметрів поїздопотоків на залізничних напрямках до впливів зовнішнього середовища є одним з можливих шляхів підвищення ефективності залізничних перевезень. Раціональні параметри поїздопотоків передбачається визначити з використанням методів векторної оптимізації.

2.2 Аналіз характеристик поїздопотоків Дніпропетровського залізничного вузла

До Дніпропетровського залізничного вузла надходять поїздопотоки з двох напрямків: зі станції Сухачівка (парний напрямок) та зі станцій Самарівка та Ігрень (непарний напрямок), з яких прибувають поїзди трьох категорій: поїзди у переробку, вантажні транзитні і пасажирські (рис. 2.1).

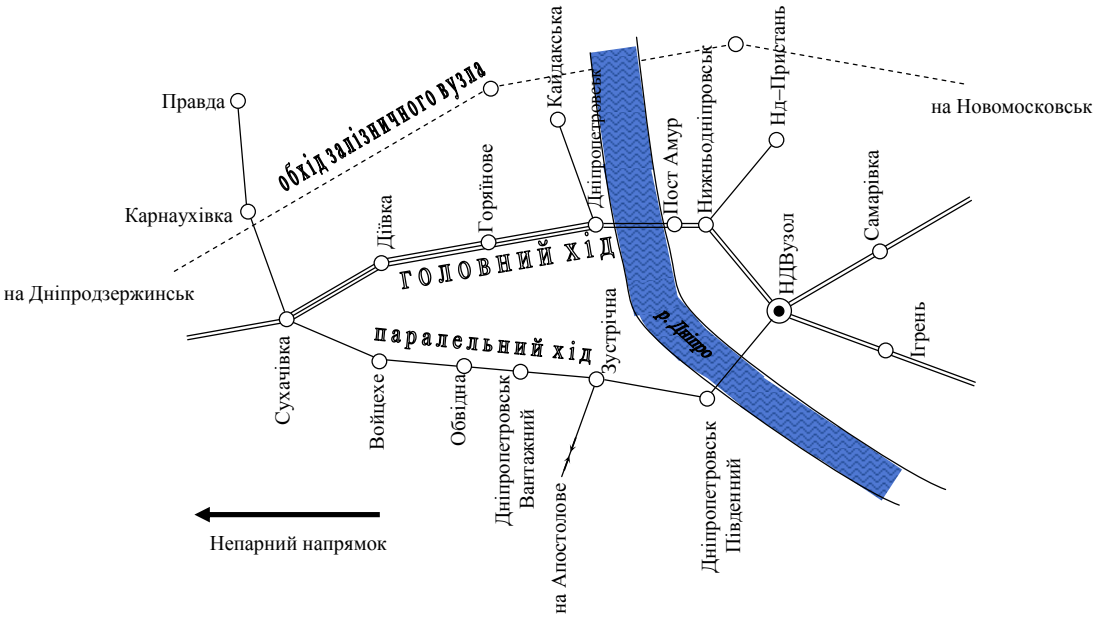


Рис. 2.1 – Схема Дніпропетровського залізничного вузла

Також у вузлі курсують передаточні поїзди для розвозу місцевого вантажу. До станції Зустрічна примикає одноколійна дільниця Зустрічна – Апостолове, напрямку Мерефа – Херсон. Крім того, існує можливість обходу Дніпропетровського залізничного вузла – для цього прокладена одноколійна дільниця між станціями Новомосковськ та Дніпродзержинськ, довжина руху по якій не набагато перевищує довжину по основному ходу (74 км проти 72 км). Діаграма розподілу поїздопотоків Дніпропетровського залізничного вузла по категоріям наведена на рис. 2.2.

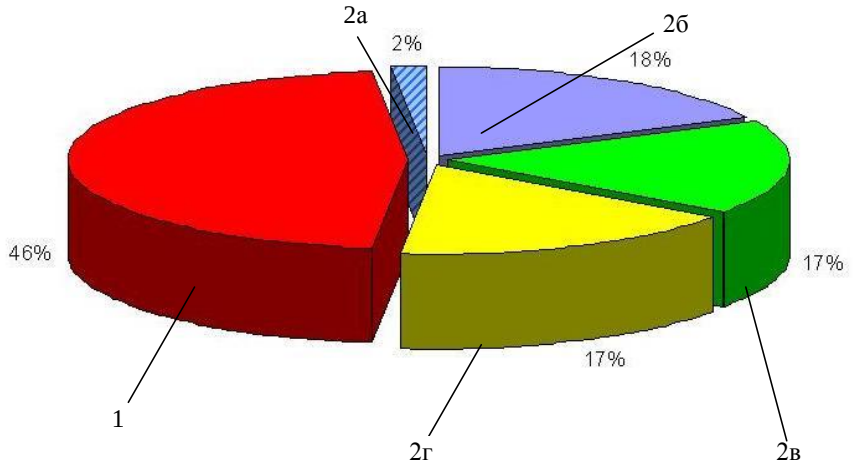


Рис. 2.2 – Діаграма розподілу поїздопотоків Дніпропетровського залізничного вузла по категоріям: 1 – пасажирські поїзди; 2 – вантажні, в т.ч.: а) передаточні; б) транзитні; в) в розформування; г) свого формування

Передаточні поїзди курсують тільки між тими станціями вузла, на яких виконуються незначні обсяги вантажної роботи. Зміна станцій навантаження-розвантаження місцевого вантажу при дослідженні не розглядалася. Тому перерозподіл вантажного поїздопотоку можливий для транзитних вантажних поїздів, поїздів у розформування та свого формування. Як показав аналіз, ці категорії поїздів загалом складають 52 % від загального поїздопотоку вузла, тобто більшу частину поїздопотоку. Статистичні характеристики таких категорій поїздів наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Числові характеристики випадкової величини поїздопотоку Дніпропетровського залізничного вузла по категоріям

Напрямок	Характеристики / Категорії поїздів	Математичне очікування	Дисперсія	Коефіцієнт варіації
Парний	Транзитні	33,3	33,9	0,17
	В розформування	26,7	26,7	0,19
	Свого формування	23,3	21,8	0,20
Непарний	Транзитні	27,7	29,8	0,20
	В розформування	33,3	40,8	0,19
	Свого формування	33,9	43,1	0,19

Існує два маршрути пропуску таких поїздів: через станцію Дніпропетровськ (головний хід) та через станцію Дніпропетровськ-Південний (паралельний хід). Діаграму розподілу загального поїздопотоку вузла по різних ходах наведено на рис. 2.3.

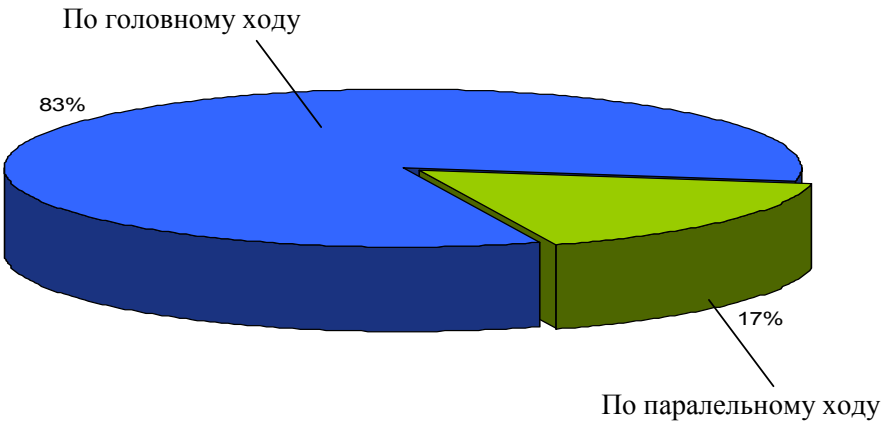


Рис. 2.3 – Діаграма розподілу загального поїздопотоку Дніпропетровського залізничного вузла на паралельних ходах

Як видно з діаграми, розподіл поїздопотоку є досить нерівномірним. Більша частина поїздів пропускається по головному ходу, тобто по двоколійній дільниці з триколійною вставкою. Крім того, величина поїздопотоку по цим двох маршрутах у парному і непарному напрямках суттєво відрізняється. На рис. 2.4 наведено діаграми розподілу поїздопотоку у вузлі по напрямках.

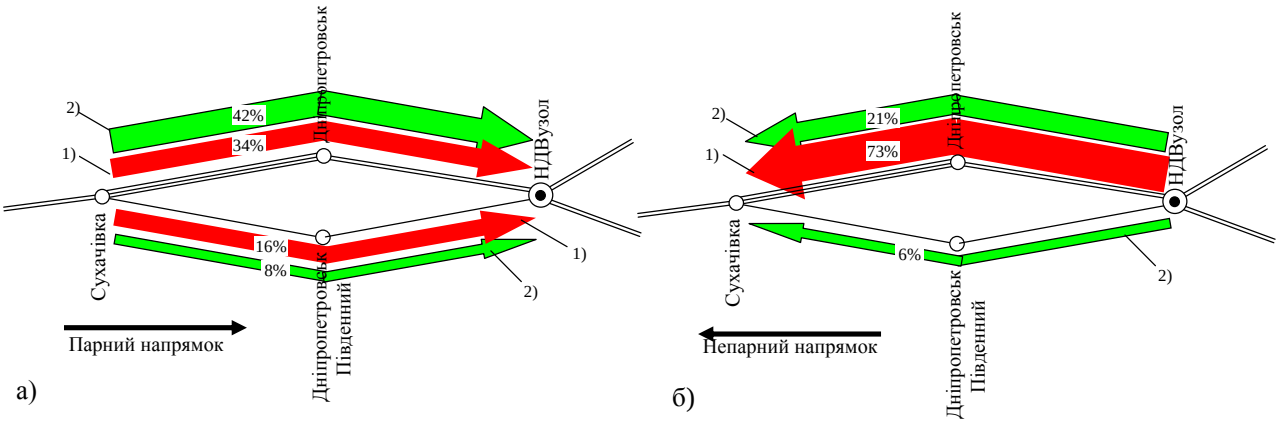


Рис. 2.4 – Діаграма розподілу поїздопотоку Дніпропетровського залізничного вузла по напрямках: а) у парному напрямку; б) у непарному напрямку. Умовні позначення: 1) вантажний потік; 2) пасажирській потік

Кількість поїздів, які щодоби проходять Дніпропетровський залізничний вузол, не є постійною величиною. Ця величина коливається у межах від 84 до 155 поїздів за добу з коефіцієнтом варіації 0,1. Гістограма розподілу випадкової величини інтенсивності поїздопотоку наведена на рис. 2.5.

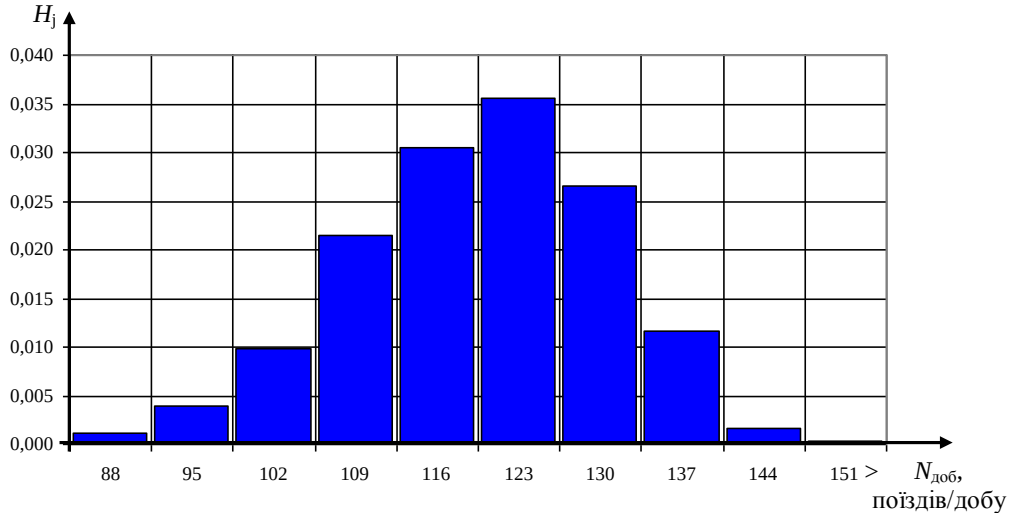
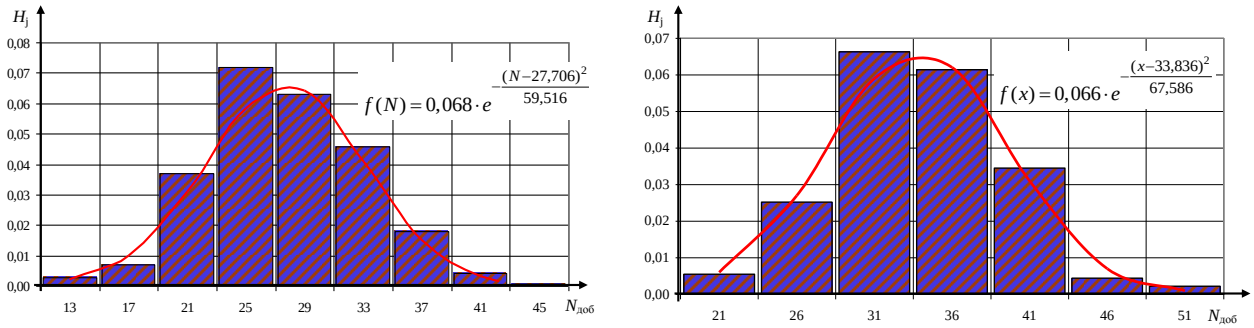


Рис. 2.5 – Гістограма розподілу величини поїздопотоку Дніпропетровського залізничного вузла

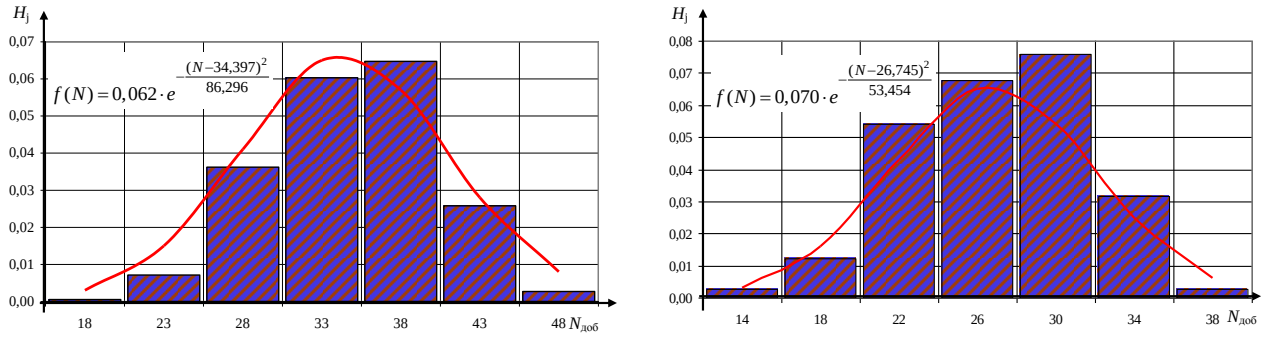
На рис. 2.6 наведено гістограму розподілу випадкової величини кількості транзитних поїздів, які надходять відповідно з непарного та парного напрямків.



а) б)

Рис. 2.6 – Гістограма розподілу кількості транзитних поїздів за добу: а) непарного напрямку; б) парного напрямку

Також виконано аналіз параметрів поїздопотоку з переробкою (рис. 2.7).



а) б)

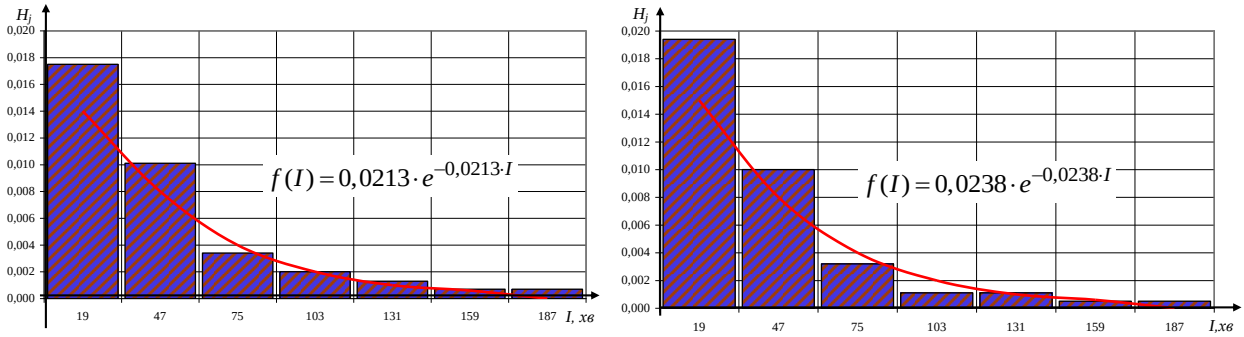
Рис. 2.7 – Аналіз параметрів розподілу поїздопотоку з переробкою: а) свого формування непарного напрямку; б) в розформування парного напрямку

Перевірка гіпотези про нормальний закон розподілу випадкової величини кількості поїздів не суперечить статистичним даним, див. табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Перевірка гіпотези про нормальний закон розподілу випадкової величини кількості поїздів

Напрямок	Категорія	Функція розподілу, $f(N)$	Перевірка гіпотези про нормальний закон розподілу за критерієм Пірсона		
			$\chi^2_{р}$	$\chi^2_{табл}$	підтвердження гіпотези
Парний	транзитні	$f(N)=0,066\cdot e^{-\frac{(N-33,836)^2}{67,586}}$	10,787	12,017	+
	в розформування	$f(N)=0,070\cdot e^{-\frac{(N-26,745)^2}{53,454}}$	10,936	12,017	+
Непарний	транзитні	$f(N)=0,068\cdot e^{-\frac{(N-27,706)^2}{59,516}}$	6,908	10,645	+
	свого формування	$f(N)=0,062\cdot e^{-\frac{(N-34,397)^2}{86,296}}$	11,155	12,017	+

Інтенсивність вхідного поїздопотоку характеризується середньою величиною інтервалу їх надходження. Гістограми розподілу інтервалів між поїздами, що надходять відповідно з парного і непарного напрямків, наведені на рис. 2.8.



а) б)

Рис. 2.8 – Гістограма розподілу випадкової величини інтервалу між поїздами: а) непарного напрямку; б) парного напрямку

За характером розподілу висунута гіпотеза про те, що інтервали між поїздами розподілені за законом Ерланга з параметром *K*. Перевірка гіпотези про закон розподілу випадкових величин інтервалів виконана за допомогою крите-

рію згоди Пірсона χ^2 [14]. Статистична обробка результатів спостережень, а також перевірка гіпотези за критерієм Пірсона показала, що немає підстав відхиляти гіпотезу про розподіл інтервалів між поїздами за законом Ерланга ($\chi^2_р < \chi^2_{табл}$; 4,78<7,78; 2,64<7,78). Результати статистичної обробки інтервалів вхідних поїздопотоків наведені у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Результати статистичної обробки інтервалів вхідних поїздопотоків

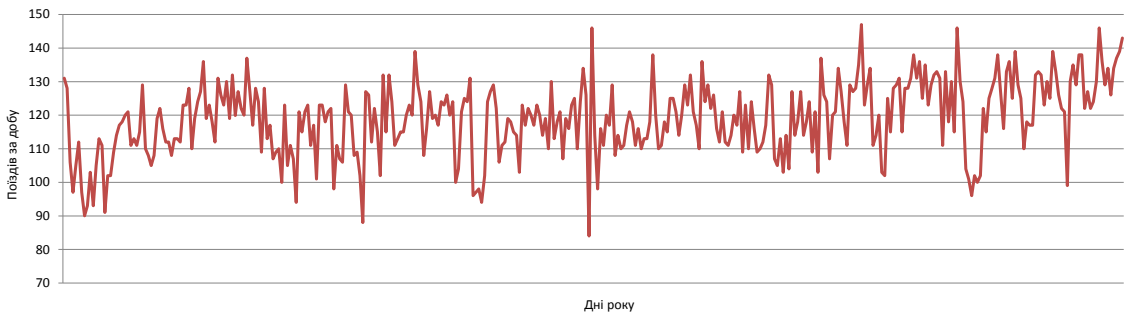
№ п/п	Напрямок	Параметри вхідного поїздопотоку				Доля поїздів даної категорії		
		$M[I]$	K	I_{min}	$\sigma[I]$	у розформування	транзитні	пасажирські
1	Парний (зі станції Сухачівка)	42,06	1	6	35,27	0,24	0,20	0,56
2	Непарний (зі станцій Самарівка та Ігрень)	47,00	1	6	38,84	0,38	0,27	0,35

При аналізі параметрів розподілу поїздопотоків у Дніпропетровському залізничному вузлі [98] виявлено, що розподіл поїздів на паралельних ходах вузла має нерівномірний характер: 76 % проти 24 % у парному напрямку та 94 % проти 6 % у непарному напрямку. Виконано аналіз інтенсивності вхідного потоку поїздів та встановлено, що інтервали між поїздами мають показниковий розподіл. Встановлено, що кількість поїздів розподілено за нормальними законами, отримано диференційні функції розподілу поїздопотоків. Знання характеру розподілу поїздів дозволить виконати техніко-економічні розрахунки з визначення раціональних варіантів перерозподілу поїздопотоків у Дніпропетровському залізничному вузлі, а також визначити економічний ефект, що пов'язаний зі зменшенням експлуатаційних витрат на пропуск поїздів.

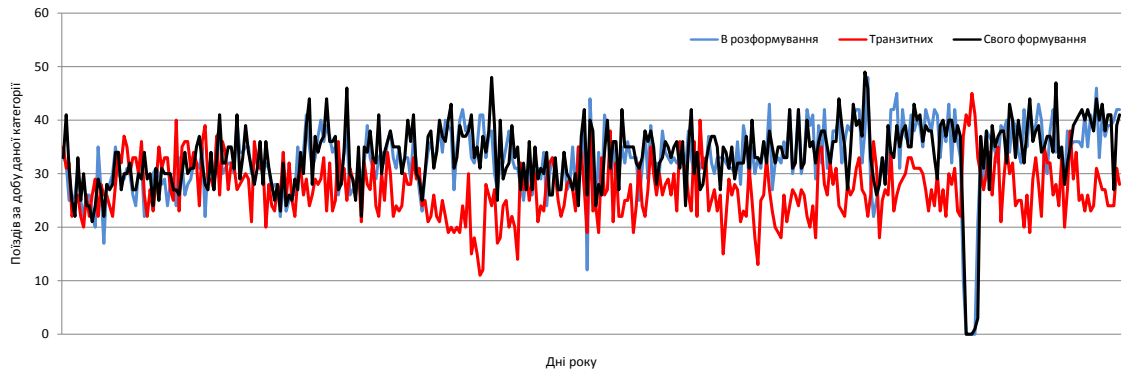
2.3 Аналіз параметрів потоків поїздів на залізничних напрямках

Дослідження, що стосуються параметрів поїздів та їх потоків, виконані на двох залізничних напрямках, що суттєво відрізняються характером поїздопотоків: вантажонапружений Донбас – Кривбасс та Кримський пасажиронапруже-

ний напрямок. Виявилося, що обсяги вантажних поїздопотоків на протязі року мають періодичний характер із виглядом синусоїдальної функції (рис. 2.9), і коливаються в межах 10-20% від свого математичного очікування 118 поїздів в обох напрямках на добу із аналогічною формою по категоріям у вузлах для вантажонапруженого напрямку. Так, для станції Нижньодніпровськ-Вузол кількість поїздів, що надходять в розформування, свого формування та транзитних мають практично однаковий діапазон коливань в межах 20-45 поїздів на добу із нормальним законом розподілу (рис. 2.10).



а)



б)

Рис. 2.9 – Характеристика обсягів вантажних поїздопотоків на залізничному напрямку на протязі року:
а) сумарні поїздопотоки в розрізі сортувальної станції напрямку;
б) потоки з розподілом по категоріям для сортувальної станції напрямку

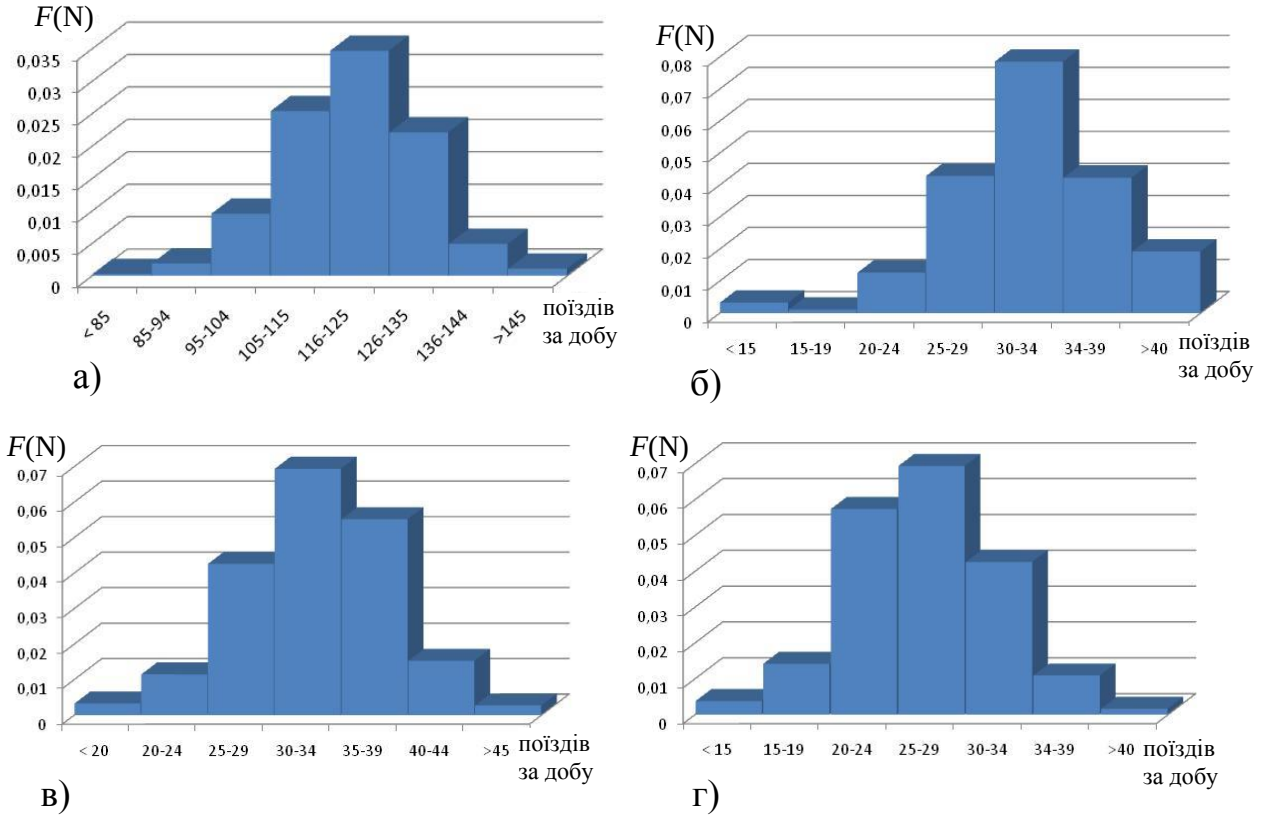


Рис. 2.10 – Розподіл випадкової величини кількості поїздів по категоріям, що надходять на станцію за добу: а) разом поїздів; б) поїздів у розформування; в) транзитних поїздів; г) поїздів свого формування

На основі виконаного аналізу отримано диференційні функції розподілу кількості поїздів різних категорій, що прямують по напрямку, в розрізі опорної сортувальної станції:

– в розформування: $f(N)=\dfrac{1}{5{,}87\cdot\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(N-31{,}9)^2}{68{,}9}}$;

– транзитних: $f(N)=\dfrac{1}{5{,}54\cdot\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(N-26{,}3)^2}{61{,}4}}$;

– свого формування $f(N)=\dfrac{1}{5{,}67\cdot\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(N-32{,}5)^2}{64{,}3}}$;

– разом поїздів $f(N)=\dfrac{1}{11{,}6\cdot\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(N-118{,}4)^2}{269{,}1}}$.

Випадкова величина інтервалів між вантажними поїздами в потоці для транзитних дільниць напрямків розподілена за законом Ерланга із параметром

$k = 1$ (рис. 2.11). Чим ближче проводити аналіз розподілу інтервалів між поїздами до сортувальних станцій, тим меншим стає статистичне значення коефіцієнту варіації інтервалів υ (зменшується від 0,9-0,93 до 0,6-0,7). Розрахунки показали, що відхилення від показникового закону розподілу $f(I) = \lambda e^{-\lambda I}$ незначні і перевірки закону розподілу за критеріями Пірсона або Уїлкоксона підтверджують висунуту гіпотезу про відповідний розподіл.

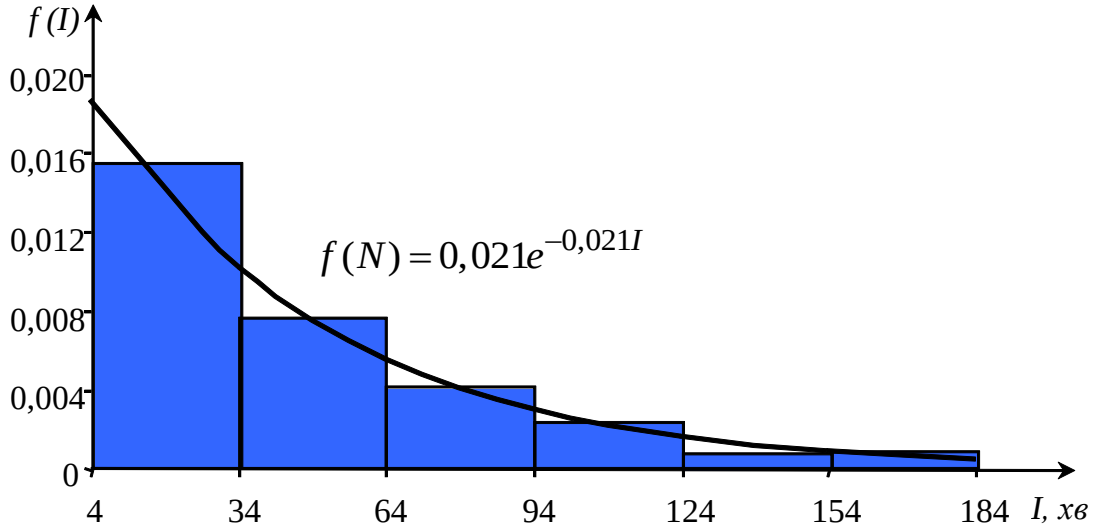


Рис. 2.11 – Розподіл випадкової величини інтервалів між поїздами в потоці

При вивченні інтервалів між одиницями потоку поїздів на залізничних дільницях, де на кінцевих станціях локомотиви прямують завжди по обороту, існує взаємозв'язок між парними та непарними потоками. Він пояснюється технологією роботи залізниць, в якій на локомотивних та дорожніх диспетчерів покладено функцію узгодження ниток графіку парних та непарних потоків для мінімізації простою поїздів в очікуванні локомотивів і локомотивів в очікуванні поїздів на станціях обороту локомотивів. Для станції П’ятихатки-Стикова Придніпровської залізниці було вивчено характер випадкової величини простою локомотивів по обороту. Виявилося, що простій розподілений за законом Ерланга з математичним очікуванням $M[t]$=102 *хв* та коефіцієнтом Ерланга k=5. (рис 2.12).

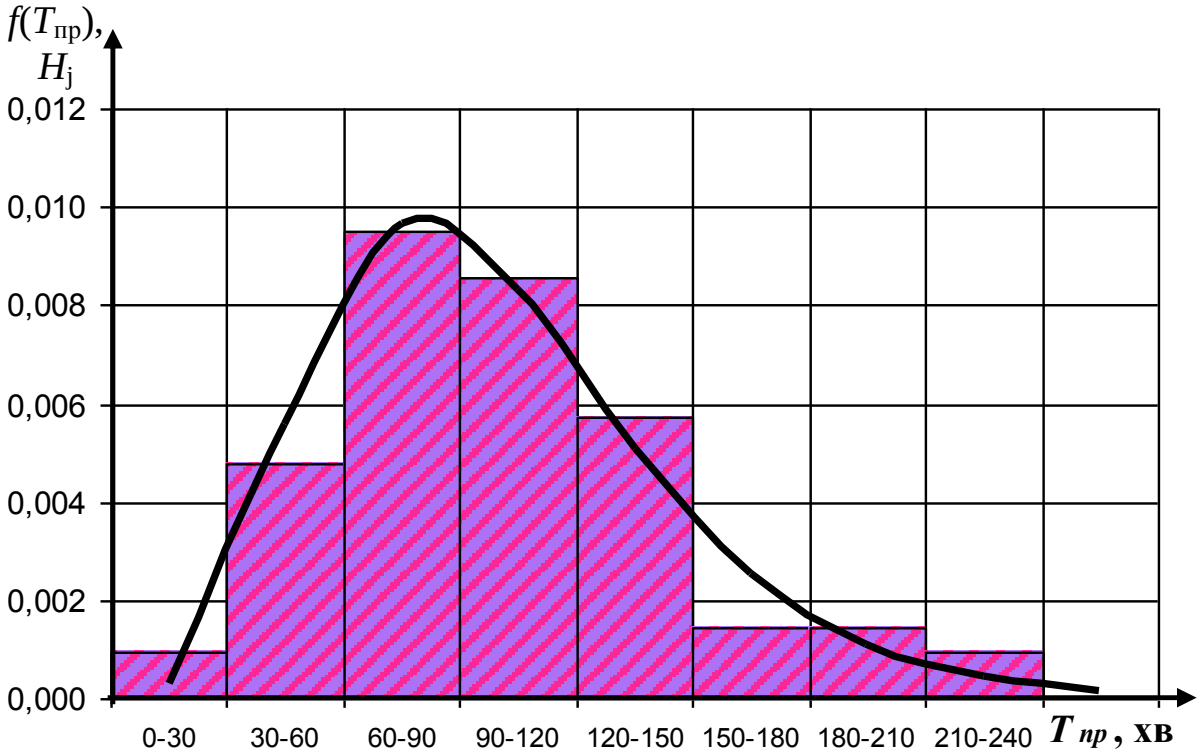


Рис. 2.12 – Розподіл випадкової величини простою поїздів в очікуванні локомотивів по станції П’ятихатки-Стикова

Тому, при моделюванні потоків поїздів пропонується спочатку моделювати, наприклад, парний потік за показниковим законом розподілу, а потім до моментів прибуття парних поїздів на кінцеву станцію (або до їх математичних очікувань) прив’язувати моменти відправлення непарних поїздів з інтервалами, розподіленими за законом відповідним до закону простою локомотивів по обороту.

Параметри поїздів як одиниць потоку можуть суттєво відрізнятися в залежності від напрямку руху. На переважній більшості існуючих залізничних напрямків масових перевезень можна виділити переважно вантажний напрямок та переважно порожній напрямок руху вагонопотоків. Це пояснюються структурою вантажопотоку і породжує окрему категорію порожніх поїздів в потоці.

На переважно вантажному напрямку маса поїздів має нормальний закон розподілу (рис. 2.13) із математичним очікуванням $M[Q]$=4770 *т* та середньоквадратичними відхиленням $\sigma[Q]_{Д\text{-}К}$=290 *т* і $\sigma[Q]_{Кр}$=580 *т* для вищезазначених напрямків. У порожньому напрямку при аналізі поїздопотоку необхідно розділити порожні та навантажені поїзди із відповідною для напрямку пропорцією.

Так. для напрямків, що досліджувалися, частина порожніх поїздів складає 45-50 % в переважно порожніх напрямках із Кримського регіону та із центральної частини України в Донбас із параметрами $M[Q]$=1610 *т* і $\sigma[Q]_{Кр}$=300 *т* (рис. 2.14).

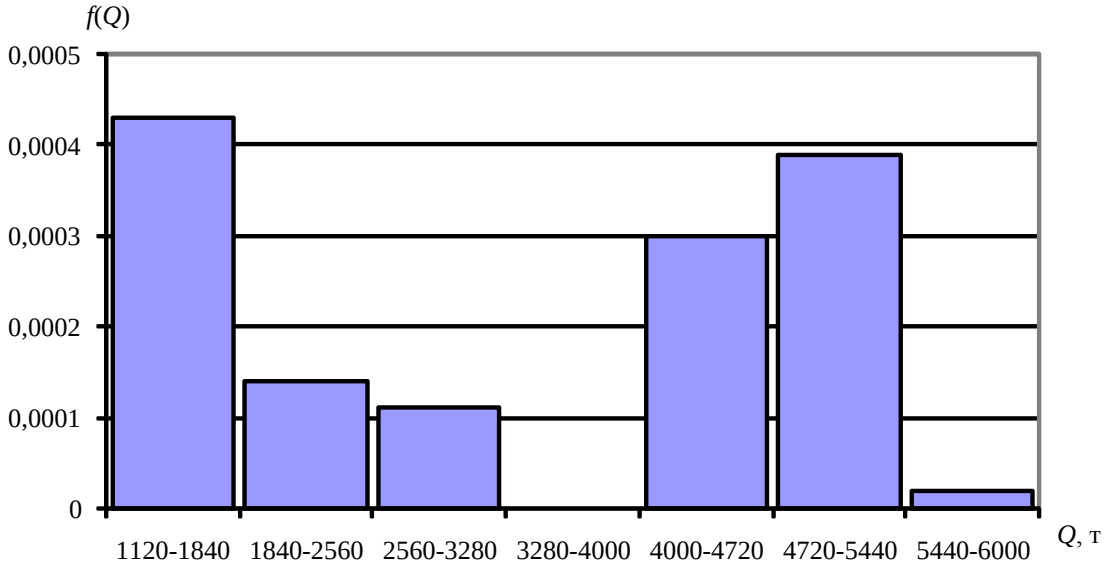


Рис. 2.13 – Розподіл маси поїздів для потоків парного та непарного напрямку

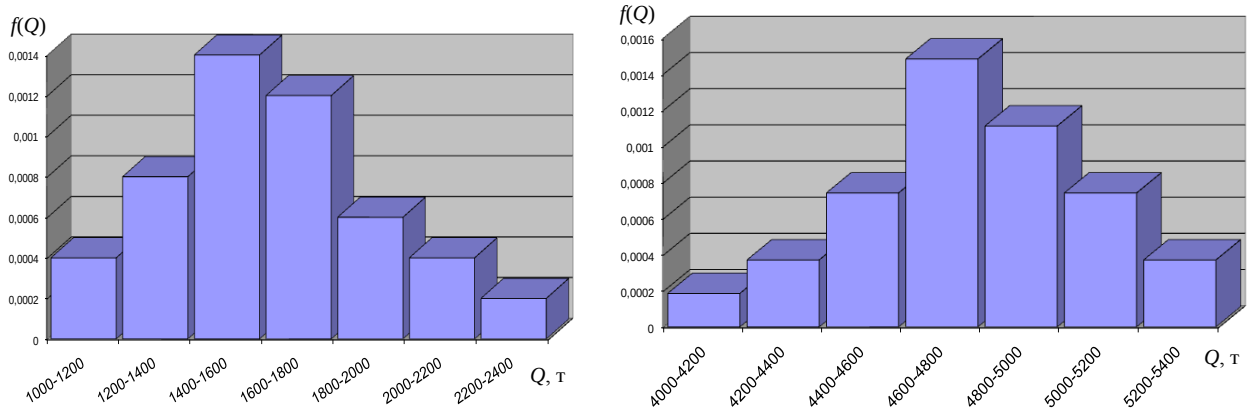


Рис. 2.14 – Розподіл маси поїздів порожнього та навантаженого потоків

Диференційні функції розподілу маси поїздів мають наступний вигляд

– порожній потік: $f(Q) = \dfrac{1}{300 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Q-1610)^2}{180000}}$;

– навантажений потік: $f(Q) = \dfrac{1}{290 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Q-4770)^2}{168200}}$.

Довжина составів транзитних поїздів вантажонапруженого напрямку коливається в широких межах від 20 до 100 умовних вагонів або 280-1400 *м*. Роз-

поділ цієї випадкової величини представлено на рис. 2.15. Нижня частина розподілу досягається місцевими поїздами (вивізними та збірними), верхня частина – порожніми поїздопотоками.

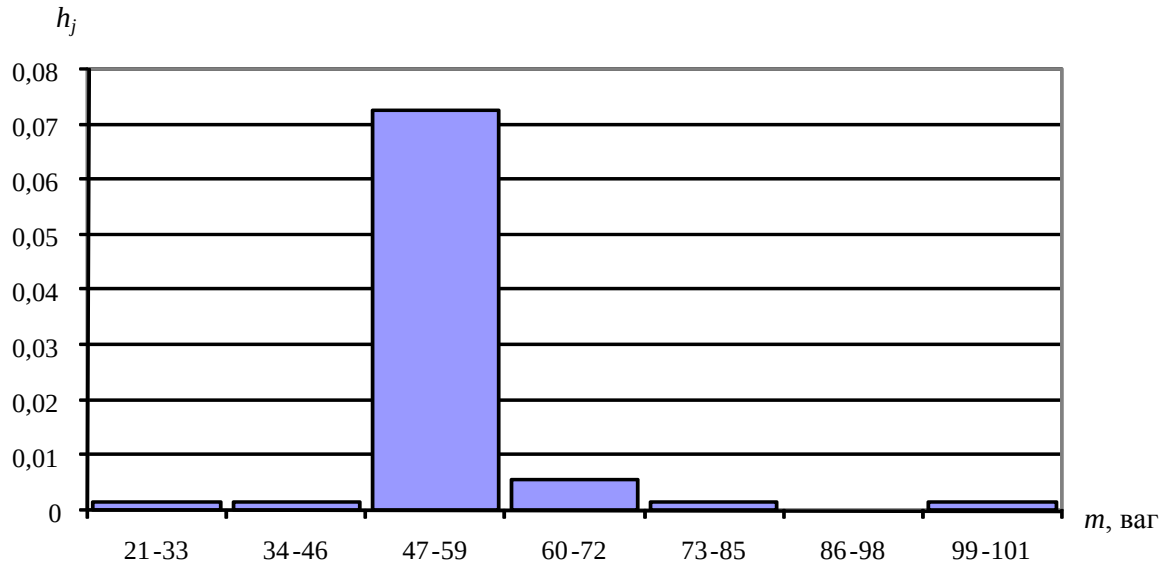


Рис. 2.15 – Гістограма розподілу випадкової величини довжини поїздів

Як видно з розподілу, найбільшу кількість складають ті состави, що мають масовий характер довжини, тобто від 49 до 61 вагону в поїзді (рис. 2.16).

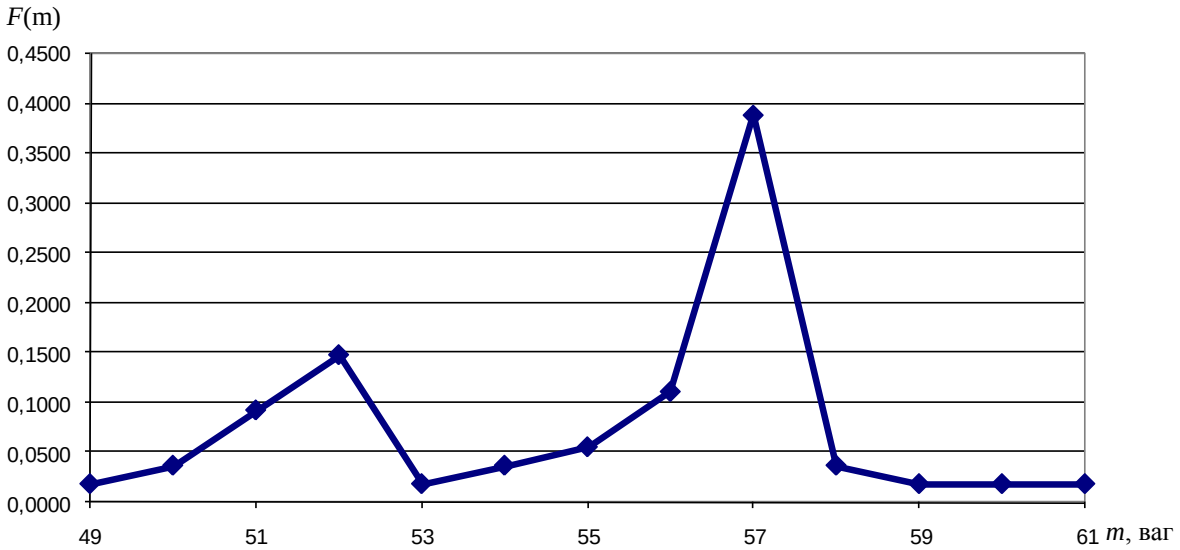
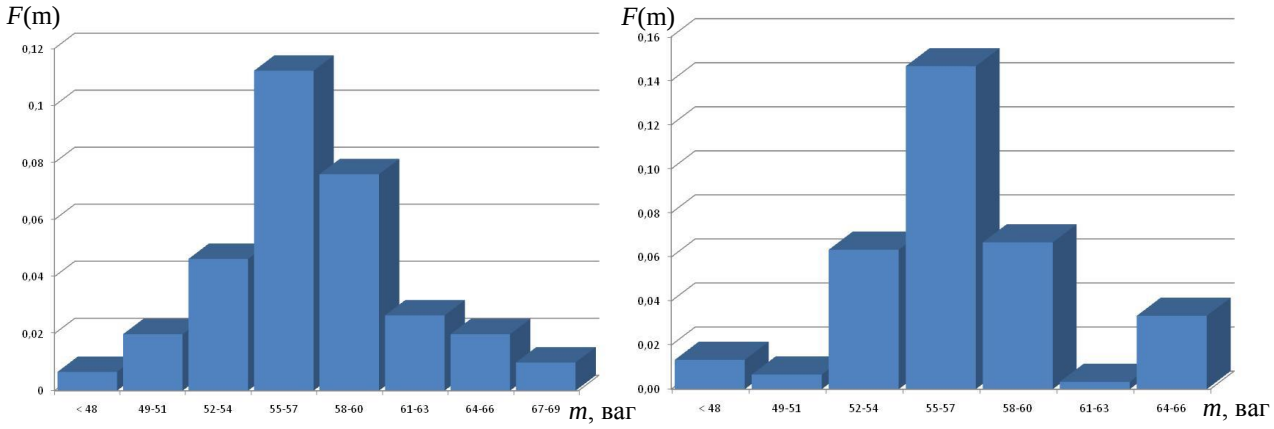


Рис. 2.16 – Гістограма розподілу випадкової величини найбільш ймовірної довжини поїздів

Як показує аналіз, 39 % транзитних поїздів мають стандартну довжину прийнятих на напрямку, 9 % поїздів прямують підвищеної довжини і 52 % поїздів мають запас для збільшення довжини. Це пояснюється тим, що частина з

них при формуванні обмежувалась за масою, частина формувалась на станціях, що належать до інших напрямків з іншою стандартною довжиною поїздів.

Довжина составів вантажних поїздів пасажиронапруженого напрямку коливається в межах від 47 до 71 вагону. Розподіл цієї випадкової величини представлено на рис. 2.17 а). Цей поїздопотік має як стандартну довжину прийнятих на напрямку составів (до 57 вагонів), так і практично рівноймовірнісні відхилення довжини від стандарту.



а) б)

Рис. 2.17 – Гістограма розподілу випадкової величини довжини составів вантажних поїздів пасажиронапруженого напрямку

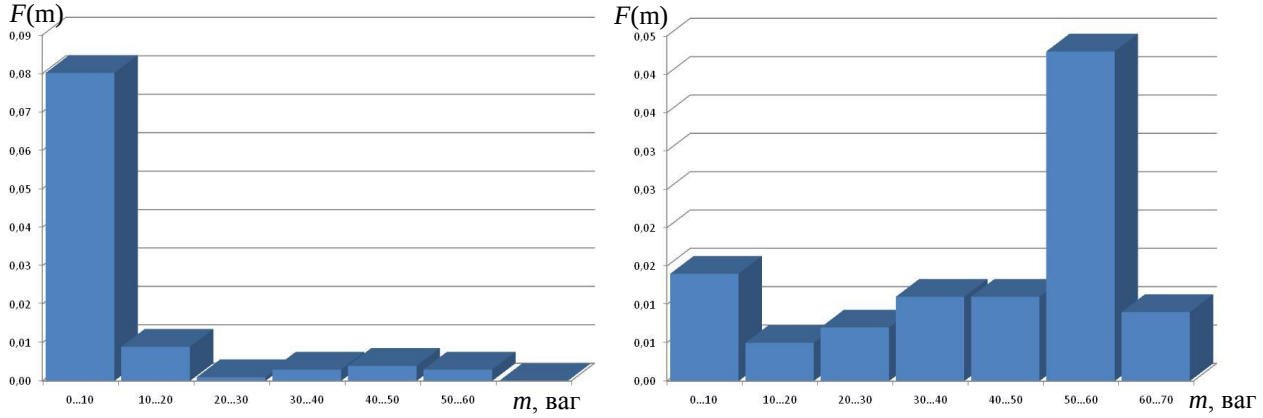
Аналіз розподілу довжини поїздів, показує, що вона є випадковою величиною із нормальним законом розподілу: $f(m) = \frac{1}{5,2 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(m-57,84)^2}{54,08}}$.

Що стосується парного, менш завантаженого напрямку, то розподіл його випадкової величини є нормальним, якщо відкинути порожні подовжені состави (вони складають 10-15% на практиці – рис. 2.17 б). Тут спостерігається два піки: більшість поїздів прямує стандартної довжини 57 умовних вагонів та подовженою з порожніми поїздопотоками довжиною 64-66 вагонів.

В результаті аналізу структури поїздопотоку вантажних поїздів [100–101] було визначено, що 90% усіх составів складається із завантаженого вагонопотоку див. рис. 2.18 а), і по 5% змішаного та порожнього вагонопотоків для переважно вантажного напрямку. Середньостатистична кількість порожніх вагонів при цьому складала 10 *ваг/сост* із дисперсією 12 (*ваг/сост*)^2.

В зворотному напрямку переважає вже порожній вагонопотік (близько

50 %), а на інших проміжках можлива кількість порожніх вагонів у составах поїздів рівноймовірна – рис. 2.18 б).



а) б)

Рис. 2.18 – Гістограма розподілу випадкової величини кількості порожніх вагонів у составах поїздів: а) вантажонапружений напрямок; б) переважно порожній напрямок

Для визначення параметрів розподілу випадкової величини довжини приймально-відправних колій станцій на залізничній ділянці на підставі аналізу колійного розвитку станцій зроблена вибірка 148 значень довжин приймально-відправних колій та виконано її статистичну обробку.

Умовна довжина приймально-відправних колій станцій ділянки (l), являє собою випадкову величину дискретного типу. Для визначення статистичних характеристик її розподілу з наведених даних, що наведені у додатку П, вибирається найменше l_{min} та найбільше l_{max} значення і далі складається статистичний ряд розподілу l у вигляді табл. 2.4.

За даними табл. 2.4 розраховуються параметри розподілу кількості вагонів у складі поїзда:

– середнє статистичне значення $M[l] = \sum l_j B_j$;

– статистична дисперсія $D[l] = \sum l_j^2 B_j - M[l_j]^2$;

– середньоквадратичне відхилення $\sigma[l] = \sqrt{D[l]}$;

– коефіцієнт варіації $\vartheta_l = \sigma[l]/M[l]$.

Таблиця 2.4 Статистичний ряд розподілу та визначення числових характеристик випадкової величини *l*

Номери розрядів	$l_{л(j)} \div l_{п(j)}$	$\bar{l}_j$, *хв*	K_j	B_j	$l_j B_j$	$\bar{l}_j^2 B_j$	h_j
1	40 - 43	41,5	2	0,014	0,561	23,274	0,0045
2	44 - 47	45,5	4	0,027	1,230	55,953	0,0090
3	48 - 51	49,5	12	0,081	4,014	198,669	0,0270
4	52 - 55	53,5	17	0,115	6,145	328,772	0,0383
5	56 - 59	57,5	37	0,250	14,375	826,563	0,0833
6	60 - 63	61,5	46	0,311	19,115	1175,564	0,1036
7	64 - 67	65,5	13	0,088	5,753	376,846	0,0293
8	68 та >	69,5	17	0,115	7,983	554,826	0,0383
ВСЬОГО			148	1	59,176	3540,466	-

Остаточні значення числових характеристик:

Математичне очікування $M[l]$ = 59,176 *ваг*;

Дисперсія $D[l]$ = 3540,466 – 59,176^2 = 38,71 (*ваг*^{2});

Середньоквадратичне відхилення $\sigma[l] = \sqrt{38,71} = 6,22$ (*ваг*);

Коефіцієнт варіації $\nu[l] = \dfrac{6,22}{59,176} = 0,105$.

Для наочності статистичний ряд подається у графічному вигляді (рис. 2.19).

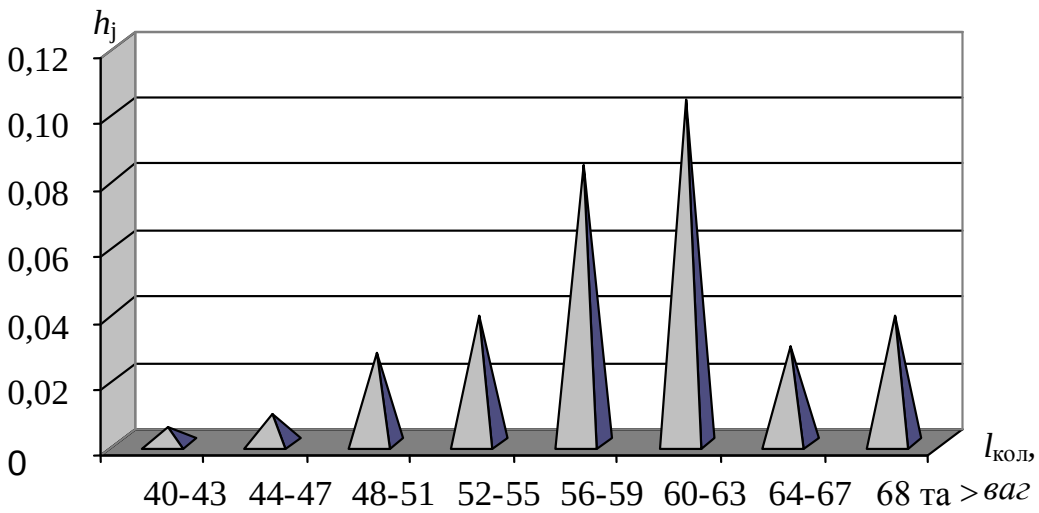


Рис. 2.19. Гістограма розподілення випадкової величини *l*

Таким чином, побудовано статистичний ряд випадкової величини умовної довжини приймально-відправних колій станцій залізничної ділянки (*l*). Встановлено, що математичне очікування величини *l* становить 59,18 ваг і розраховано ймовірність появи довжини приймально-відправної колії більшу за 60 умовних вагонів за наступною формулою:

$$B_j\,(l_j > 60) = 1 - B_j\,(l_j < 60) \qquad (2.1)$$

$$B_j\,(l_j > 60) = 1 - \sum_{j=1}^{5} B_j = 1 - (0{,}014 + 0{,}027 + 0{,}081 + 0{,}115 + 0{,}250) = 0{,}514.$$

Аналізуючи довжину приймально-відправних колій станцій кримського напрямку, можна зазначити, що в експлуатаційній роботі є проблеми із зупинкою поїздів довжиною більше за 61 *ум. ваг.*, тому вони формуються виключно коли диспетчер має можливість без зупинного пропуску довгосоставного поїзду між вузловими станціями напрямку.

Кількість вагонів у складі поїздів має зміщений закон Ерланга і тісно пов'язана із масою поїздів (рис. 2.20). Коефіцієнт кореляції між масою та довжиною поїздів на різних напрямках коливається від 0,64 до 0,81 для переважно навантаженого потоку. Функціональний зв'язок між масою та довжиною поїздів встановлено методом мінімальних квадратів. Суть його полягає у знаходженні такої функції $Q=f(m)$, яка б найкращим чином описувала поле точок (m, Q). Найкращим чином описує поле точок функція, яка має найменшу суму відхилень статистичних і теоретичних значень, що в математичному вигляді відповідає запису:

$$S = \sum_{i=1}^{n} (f(m_{\mathrm{i}}) - Q_{\mathrm{i}})^2 \to \min. \qquad (2.2)$$

Графічне зображення поля точок (рис. 2.20) та отримане значення коефіцієнта кореляції дають підстави для опису залежності лінійною функцією виду $Q = a + bm$. Підставивши цю функцію у вищезазначену формулу, отримаємо цільову функцію

$$S = \sum_{i=1}^{n} (a + bm_i - Q_{\mathrm{i}})^2 \to \min, \qquad (2.3)$$

де a, b – коефіцієнти, які підлягають визначенню.

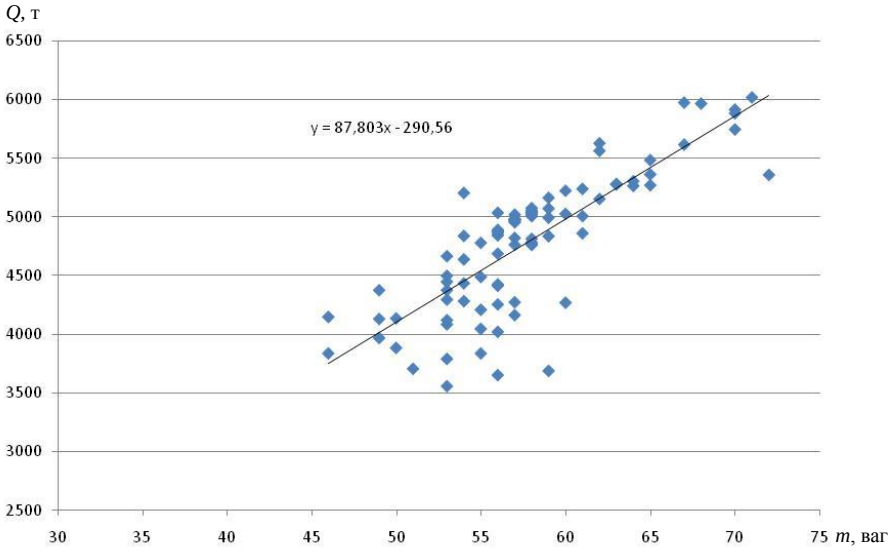


Рис. 2.20 – Поле точок $N(m;Q)$

Для пошуку екстремуму функції знайдені частинні похідні по її аргументам та прирівняні до нуля. В результаті отримано систему лінійних рівнянь із статистичними параметрами розподілу маси та довжини поїздів:

$$\begin{cases} a + bM[m] = M[Q] \\ aM[m] + bM[m^2] = M[mQ] \end{cases}, \tag{2.4}$$

де $M[m]$, $M[Q]$, $M[m^2]$, $M[mQ]$ – математичні очікування величин довжини составів, маси поїздів, квадрату довжини та добутку маси на довжину поїздів.

З цієї системи виходить, що значення коефіцієнту b є відношенням кореляційного моменту випадкових величин маси та довжини до дисперсії довжини:

$$b = \frac{M[mQ] - M[m]M[Q]}{M[m^2] - (M[Q])^2} = \frac{K_{mQ}}{D[m]}. \tag{2.5}$$

В результаті отримано функціональну залежність $Q = 87{,}803m - 290{,}56$.

При аналізі параметрів потоків поїздів на залізничних напрямках [100–103] встановлено, що моделювання потоків поїздів не може відбуватися незалежно по напрямкам. Крім того, параметри поїздів не можуть моделюватися окремо кожний, оскільки між ними існує внутрішній кореляційний зв'язок. Отримані результати доцільно використовувати для побудови математичних моделей залізничних напрямків з метою зменшення експлуатаційних витрат на пропуск поїздопотоків.

РОЗДІЛ 3
МОДЕЛЬ РАЦІОНАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ ПОЇЗДОПОТОКІВ ПО ЗАЛІЗНИЧНІЙ МЕРЕЖІ

Ринкова економіка України передбачає високу динаміку економічних зв'язків, у тому числі і транспортних потоків. Тому на залізницях країни триває активний пошук нових форм і методів роботи, що забезпечують взаємовигідні відносини з регіонами і підприємствами галузі, підвищення прибутковості перевізного процесу, конкурентоспроможність з іншими видами транспорту. У той же час гостро стоїть проблема зниження собівартості перевезень.

На Україні існує розвинена мережа залізниць, яка забезпечує потреби країни в масових перевезеннях вантажів та пасажирів. Використання пропускної спроможності залізничних напрямків, особливо під час введення літнього графіку руху поїздів, близьке до граничного, тому завдання вибору раціональних варіантів пропуску поїздопотоків на напрямках залізничної мережі в умовах обмеження їх пропускної спроможності є досить актуальним. При вирішенні цього завдання в роботах [10, 18, 40–42, 104–105] запропоновано використовувати різні критерії оптимальності, такі як відстань транспортування, тривалість доставки вантажів, загальні поїздо-кілометри пробігу, вартість пропуску поїздів на напрямку, експлуатаційні витрати залізниці на пропуск поїздопотоків та інші. В ринкових умовах при оптимізації параметрів поїздопотоків на напрямках використовувалися й інші підходи щодо визначення критерію оптимізації [106–109], які постають перед залізницею в умовах конкуренції з іншими видами транспорту.

Оптимальна організація вагонопотоків дозволяє прискорити обіг вагонів та підвищити рівень використання ресурсів мережі залізниць. Також в задачах розглядається раціональний розподіл потоків з урахуванням роботи станцій переробки. При цьому враховуються обмеження, що накладаються умовами збереження потоків у вузлах і неперевищення потоками пропускної спроможності дуг.

На даний момент потужним механізмом дослідження функціонування залізничних мереж – є сучасний математичний апарат, заснований на принципах

багатокритеріальної оптимізації. В області програмних систем методів оптимізації в сфері удосконалення технології пропуску поїздів велика увага в роботах [19–20] приділяється питанням теорії графів. Залізнична мережа представляється як орієнтований кінцевий зв'язний граф з початковою та кінцевою вершинами. В роботі [50] розглядаються питання, пов'язані з вибором рішень при наявності декількох критеріїв. Формулюється відомий принцип Еджворта-Парето [110] і встановлюється умови застосування цього принципу. Показано, що за допомогою запропонованого підходу, використовуючи лише кінцевий набір інформації про відносну вагу критеріїв, можна виконати апроксимацію множини потенційно-оптимальних рішень багатокритеріальної задачі.

Також представлене завдання може бути формалізоване у вигляді класичної транспортної задачі, яка полягає у визначенні обсягів перевезень від постачальників до споживачів з метою мінімізації транспортних витрат [111]. Основні недоліки такого підходу полягають в тому, що завдання вирішується для однорідного вантажу та не враховується пропускна спроможність ланок мережі.

Таким чином, критерій вибору раціональних варіантів пропуску поїздопотоків на напрямках залізничної мережі повинен містити в собі декілька компонентів, для того, щоб при оптимізації врахувати якомога більше факторів, що впливають.

3.1 Постановка задачі розподілу поїздопотоків на мережі

В даному розділі завдання визначення раціональних потоків на мережі представлене як задача векторної оптимізації [112–113].

Нехай $G(V,E)$ – неорієнтований граф з переліком вершин V і ребер E. Кожному ребру відповідає число $R(e)$.

Граф $G(V,E)$ має задані потоки P_{ij}, $i, j \in V$.

Нехай W_{ij} – набір простих шляхів з i в j, а ω – деякий простий шлях з W_{ij}.

Позначимо через $X_{ij\omega}$ частину потоку P_{ij}, який реалізується на шляху ω, тоді має місце умова

$$\sum_{\omega \in W_{ij}} X_{ij\omega} = P_{ij} \ . \tag{3.1}$$

Введемо індикатор ребра e на шляху ω:

$$I_{\omega}(e) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } e \in \omega; \\ 0, \text{ якщо } e \notin \omega, \end{cases} \tag{3.2}$$

тоді сумарний потік по ребру e для набору шляхів W_{ij} складе

$$\sum_{\omega \in W_{ij}} X_{ij\omega} \cdot I_{\omega}(e), \tag{3.3}$$

а загальний потік по даному ребру e дорівнюватиме

$$N(e) = \sum_{i,j \in V} \sum_{\omega \in W_{ij}} X_{ij\omega} \cdot I_{\omega}(e); \ e \in E \ . \tag{3.4}$$

Якщо $\bar{N}(e)$ – максимально допустимий потік для ребра, то повинно виконуватися обмеження з пропускної спроможності:

$$N(e) \le \bar{N}(e), \ e \in E \ . \tag{3.5}$$

Якщо припустити, що $l(\omega)$ – довжина шляху ω, $l(\omega) = \sum_{e \in \omega} R(e)$, то величина

$$Pr = \sum_{i,j \in V} \sum_{\omega \in W_{ij}} X_{ij\omega} \cdot l(\omega) \tag{3.6}$$

може слугувати оцінкою раціональності розподілу заданих потоків P_{ij}, $i, j \in V$ на графі $G(V,E)$. Зауважимо, що в умові (3.6) при $i < j$ виконується розподіл потоків в одному напрямку, а при $i > j$ – в іншому напрямку.

Позначимо E_* – набір ребер, які були використані для побудови набору простих шляхів між усіма вершинами, тоді величина

$$L(E_*) = \sum_{e \in E_*} R(e) \tag{3.7}$$

відображає довжину мережі.

Тобто, має місце задача визначення такого розподілу потоків $X_{ij\omega}$, щоб показники $Pr(E_*)$ і $L(E_*)$ були мінімальними в умовах обмежень (3.2) та (3.6).

Іншими словами задача розподілу поїздопотоків зводиться до задачі векторної оптимізації

$$\begin{pmatrix} L(E_*) \\ Pr(E_*) \end{pmatrix} \to \min, \tag{3.8}$$

за умов (3.1) та (3.5).

Якщо розглядати граф $G(V,E)$ як модель мережі залізниці, вершинами якого є станції, а параметрами – відстані $R(e)$ та поїздопотоки P_{ij} між пунктами i та j по ребру e, тоді компонентами вектора оптимізації будуть довжина мережі вантажних перевезень $L(E_*)$ та витрати часу на доставку вантажу $Pr(E_*)$.

3.2 Побудова математичної моделі вибору раціональних варіантів пропуску поїздопотоків

Для побудови простих шляхів на графі, можна використати наступний алгоритм. Нехай N – кількість вершин у графі $G(V,E)$; z_n – початкова вершина; z_k – кінцева вершина; KP – множина простих шляхів; KW – множина варіантів можливих шляхів. Необхідно визначити всі прості шляхи з z_n в z_k.

1) Задаємо початкову та кінцеву вершину z_n і z_k. Поповнюємо $KW = \{\{z_n\}\}$.

2) Вибираємо варіант можливого шляху $w \in KW$ і видаляємо його з множини KW.

3) Визначаємо z_1, z_2,..., z_p суміжні вершини для шляху w.

4) Перевіряємо кожну суміжну вершину z_i, $i = \overline{1,p}$, $p < N$:

4.1) якщо $z_i = z_k$, то $KP \cup \{w \cup z_i\}$ – поповнюємо множину простих шляхів новим простим шляхом;

4.2) якщо $z_i \cap w = \varnothing$, то $KW \cup \{w \cup z_i\}$ – поповнюємо множину варіантів можливих шляхів новим варіантом.

5) Якщо $KW = \varnothing$ – множина варіантів можливих шляхів порожня, то побудовані всі прості шляхи, інакше переходимо до пункту 4.2.

Для прикладу розглянемо побудову простих шляхів на розгалуженому залізничному напрямку Придніпровської залізниці, який являє собою деякий граф G (рис. 3.1), що містить $N = 7$ вершин.

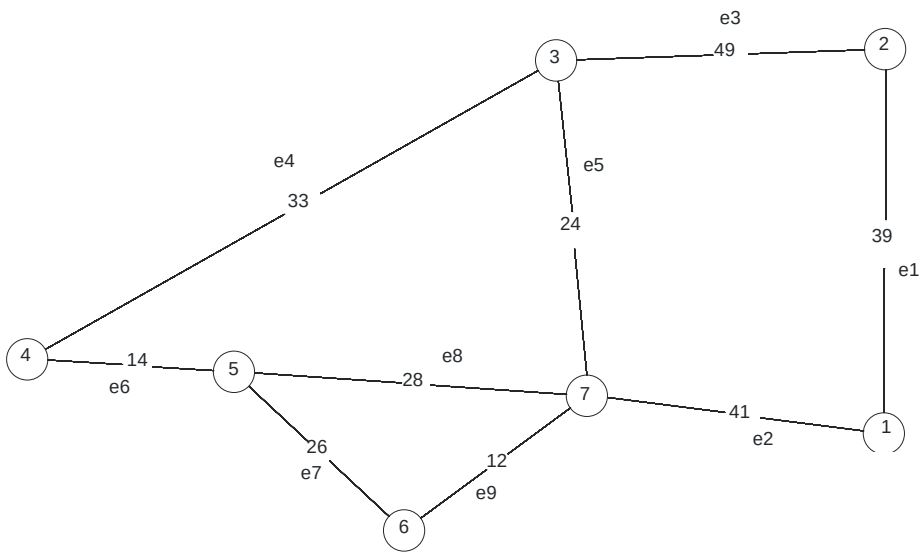


Рис. 3.1 – Розгалужений залізничний напрямок у вигляді графу мережі

У відповідності до наведеного алгоритму визначимо всі прості шляхи з $z_n = 2$ в $z_k = 4$. Поповнюємо множину варіантів шляхів $KW = \{\{1\}\}$. Обираємо один з варіантів $w = \{1\}$; видаляємо його з множини $KW = \{\}$.

Визначаємо суміжні вершини для шляху $w = \{1\}$ $z_1 = 3$, $z_2 = 1$; кількість суміжних вершин $p = 2$.

Оскільки $z_1 \neq z_k$, $z_2 \neq z_k$, то $KP = \{\}$.

Поповнюємо множину варіантів шляхів новими варіантами $KW = \{\{2,3\},\{2,1\}\}$.

Обираємо один з варіантів $w = \{2,3\}$; видаляємо його з множини $KW = \{\{2,1\}\}$.

Таким чином, у відповідності до алгоритму отримаємо наступні варіанти простих шляхів на графі від вершини 2 до вершини 4:

$$KP = \{\{2,3,4\},\{2,3,7,5,4\},\{2,3,7,6,5,4\},\{2,1,7,3,4\},\{2,1,7,5,4\},\{2,1,7,6,5,4\}\}$$

.

На рис. 3.2 представлена графічна реалізація методу побудови простих шляхів.

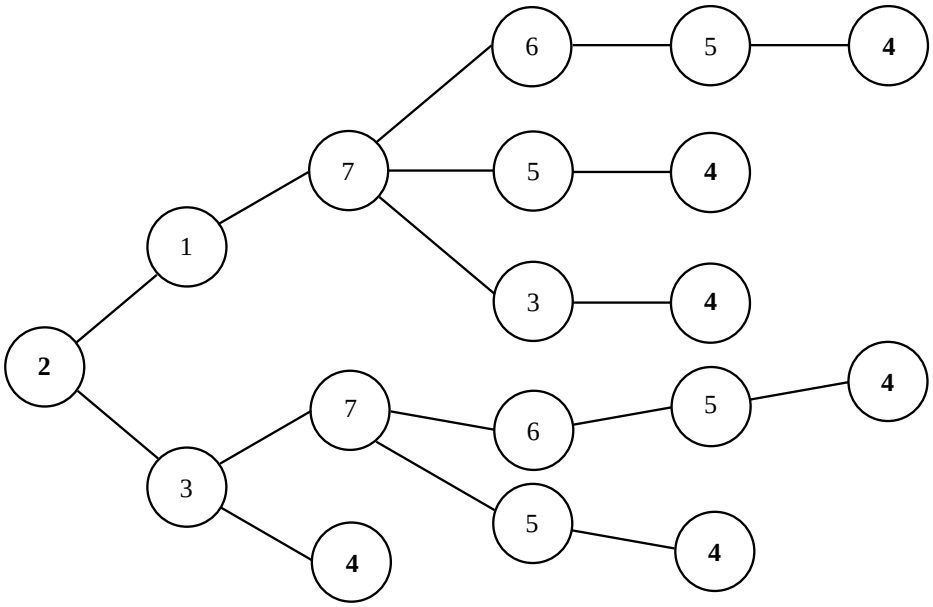


Рис. 3.2 – Графічна реалізація методу побудови простих шляхів

3.3 Розподіл поїздопотоків за напрямками

Нехай у підграфа $H(V,E_*)$ є $W(E_*)$ напрямків, ω – деякий шлях з $W(E_*)$, тоді, якщо ребро $e \in \omega$, то поїздопотік по даному ребру від напрямку позначимо через $X(e,\omega)$. Сумарний потік по ребру e складе

$$N(e) = \sum_{\substack{\omega \in W(E_*) \\ e \cap \omega = e}} X(e,\omega). \tag{3.9}$$

Величина $N(E_*) = \max\limits_{e \in E_*} N(e)$ визначає максимальний поїздопотік, тоді якщо $N(E_*) \le \bar{N}$, то граф $H(V,E_*)$ є допустимим з точки зору пропускної спроможності шляху. У випадку, якщо максимально допустимий потік $\bar{N}$ у кожного ребра різний, то допустимість графа $H(V,E_*)$ визначається співвідношенням $N(e) \le \bar{N}(e)$, $\forall e \in E_*$. Сумарний поїздопотік дуги e визначається за формулою:

$$X(e,\omega) = \sum_{\rho=1}^{j(e)} \sum_{\nu=j(e)+1}^{m_\omega} P(i_\rho, i_\nu), \tag{3.10}$$

де $P(i_\rho, i_\nu)$ – поїздопотік з i_ρ в i_ν;

$(j(e), j(e)+1)$ – номери вершин в маршруті ω, які з'єднані ребром $e \in \omega$;

m_ω – число вершин у маршруті ω.

Для реалізації розрахунків з розподілу поїздопотоків можна використати пакет обчислень *Maple* [114–115]. В ньому залізничний напрямок формалізова-

но у вигляді кінцевого графу (див. рис. 3.3), що складається з сукупності ребер *e1*={1,2}, *e2*={1,7}, *e3*={2,3}, *e4*={3,4}, *e5*={3,7}, *e6*={4,5}, *e7*={5,6}, *e8*={5,7}, *e9*={6,7} з відповідним обмеженням пропускної спроможності $\bar{N}(e)$. Приклад реалізації зазначених алгоритмів наведено в Додатку А.

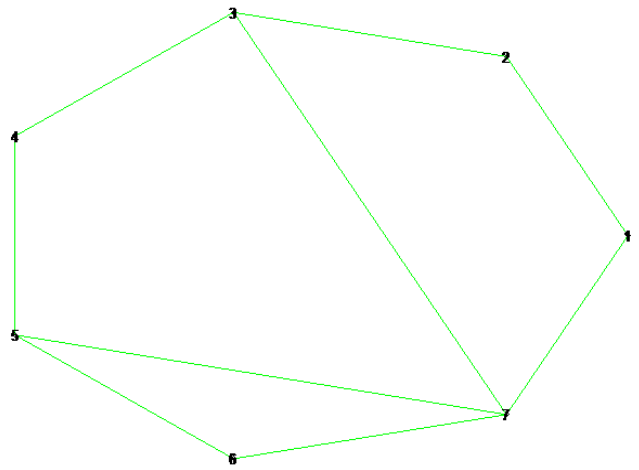


Рис. 3.3 – Вихідний граф мережі

Задається матриця критерію $T(e)$ і поїздопотоків P_{ij}, що для зазначеної мережі мають вигляд:

$$T(e)=\begin{bmatrix} 0 & 53 & 0 & 0 & 0 & 0 & 38 \\ 53 & 0 & 48 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 48 & 0 & 49 & 0 & 0 & 32 \\ 0 & 0 & 49 & 0 & 13 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 13 & 0 & 40 & 44 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 40 & 0 & 23 \\ 38 & 0 & 32 & 0 & 44 & 23 & 0 \end{bmatrix} P_{ij}=\begin{bmatrix} 0 & 2 & 20 & 0 & 5 & 5 & 14 \\ 1 & 0 & 0 & 18 & 40 & 0 & 17 \\ 0 & 0 & 0 & 11 & 7 & 3 & 10 \\ 2 & 11 & 14 & 0 & 5 & 7 & 16 \\ 3 & 10 & 11 & 5 & 0 & 20 & 8 \\ 0 & 21 & 8 & 23 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 7 & 0 & 0 & 8 & 10 & 0 \end{bmatrix}$$

На першому етапі виконання завдання необхідно побудувати остовний граф мінімальної сумарної довжини [20] $H(V,E_*)$, який показано на рис. 3.4. Сумарна довжина побудованого графа $H(V,E_*)$ становить $T(E_*)=340$, набір ребер даного графа являє собою підмножину $E_*=\{e1,e2,e5,e6,e8,e9\}$.

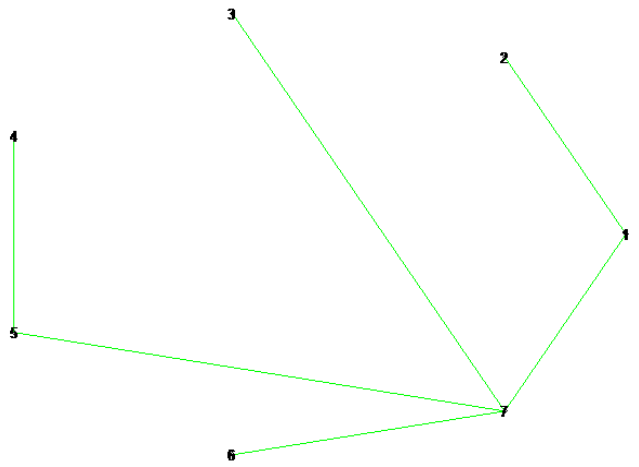


Рис. 3.4 – Остовний граф мінімальної сумарної довжини для критерію $T(e)$

В табл. 3.1 представлена множина всіх простих шляхів з i в j для графа $H(V, E_*)$.

Таблиця 3.1 – Перелік шляхів графа

		В вершину					
		2	3	4	5	6	7
З вершини	1	[$e1$]	[$e1$, $e3$]	[$e1$, $e3$, $e4$]	[$e1$, $e3$, $e4$, $e6$]	[$e1$, $e3$, $e5$, $e9$]	[$e1$, $e3$, $e5$]
	2	–	[$e3$]	[$e3$, $e4$]	[$e3$, $e4$, $e6$]	[$e3$, $e5$, $e9$]	[$e3$, $e5$]
	3	–	–	[$e4$]	[$e4$, $e6$]	[$e5$, $e9$]	[$e5$]
	4	–	–	–	[$e6$]	[$e4$, $e5$, $e9$]	[$e4$, $e5$]
	5	–	–	–	–	[$e6$, $e4$, $e5$, $e9$]	[$e6$, $e4$, $e5$]
	6	–	–	–	–	–	[$e9$]

Для мережі, що зображена на рис. 3.4, розподіл потоків по кожному ребру відображений у табл. 3.2, а значення показника раціональності розподілу потоків складає *Pr1* (E_*)=17589 *поїздо-хв*.

Таблиця 3.2 – Розподіл потоків по дугам остовного графу за критерієм $T(e)$

Ребро	$e1$	$e2$	$e5$	$e6$	$e8$	$e9$
Вага ребра, хв	53	38	32	13	44	23
Поїздопотік	77	119	51	57	132	35

При цьому, множина ребер, які не увійшли в граф $H(V, E_*)$ являє собою {$e3$, $e4$, $e7$}. З цієї множини обираємо комбінації ребер мінімальної ваги *QE*={{$e7$}, {$e3$}, {$e4$}, {$e3$, $e7$}, {$e4$, $e7$}, {$e3$, $e4$}, {$e3$, $e4$, $e7$}} та по черзі додаємо їх до графа $H(V, E_*)$, після чого знову проводимо розподіл потоків, кожного разу фіксуючи значення показника раціональності *Pr1* (E_*), яке змінюється.

Слід зазначити, що при виборі іншого критерію оптимальності розподіл потоків буде інший. Так, наприклад, якщо матриця критерію буде мати вигляд

$$R(e)=\begin{bmatrix} 0 & 39 & 0 & 0 & 0 & 0 & 41 \\ 39 & 0 & 49 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 49 & 0 & 33 & 0 & 0 & 24 \\ 0 & 0 & 33 & 0 & 14 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 14 & 0 & 26 & 28 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 26 & 0 & 12 \\ 41 & 0 & 24 & 0 & 28 & 12 & 0 \end{bmatrix},$$

а матриця поїздопотоків, обмеження та сама мережа залишаться незмінними, то остовний граф мінімальної сумарної довжини буде відрізнятися від графу, наведеного на рис. 3.4, та матиме вигляд, який показано на рис. 3.5.

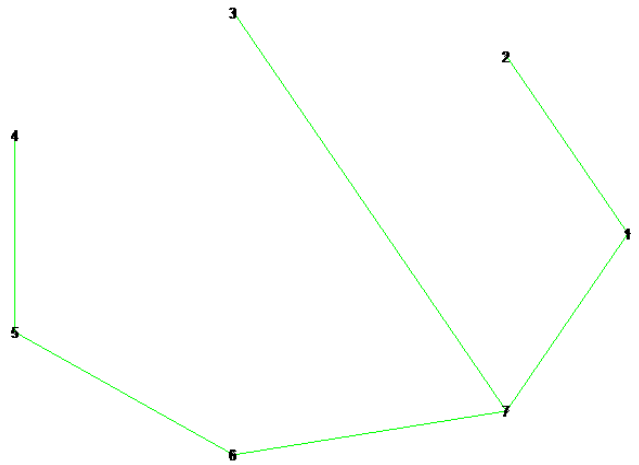


Рис. 3.5 – Остовний граф мінімальної сумарної довжини для критерію $R(e)$

Розподіл потоків по кожному ребру буде таким, який відображений у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Розподіл потоків по дугам остовного графу за критерієм $R(e)$

Ребро	$e1$	$e2$	$e5$	$e6$	$e7$	$e9$
Витрати ресурсів, у.о.	1763	798	466	512	838	300
Поїздопотік	77	119	51	57	132	113

Це означає, що рішення буде відрізнятися в залежності від обраного критерію оптимальності. Таким чином, постає задача вибору оптимального розподілу поїздопотоку, в якому необхідно ув’язати між собою два різні критерії [116]. Для рішення такого завдання обрана векторна оптимізація [113]. В такій постановці задача вирішується за допомогою векторного критерію, компонентами якого є необхідні величини, в даному випадку – $T(e)$ та $R(e)$.

Значення показників раціональності розподілу потоків для зазначених

вище графів зведемо в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Значення показників раціональності при додаванні до графу комбінації ребер

Номер варіанта	Ребра, що додаються до графу $H(V, E_*)$	Вага ребер, що додаються до графу		Значення показника раціональності для мережі	
		хв	*у.о.*	*поїздо-хв*	*у.о.*
1	-	-	-	17589	515923
2	e7	40	838	16860	428179
3	e8	48	1915	16764	502423
4	e2	49	1225	17051	476756
5	e7, e8	88	2753	16035	388840
6	e2, e7	89	2063	16322	418378
7	e2, e8	97	3140	14217	430120
8	e2, e7, e8	137	3978	14300	394000

Графічне представлення незрівнянних між собою по Парето варіантів представлено на рис. 3.6.

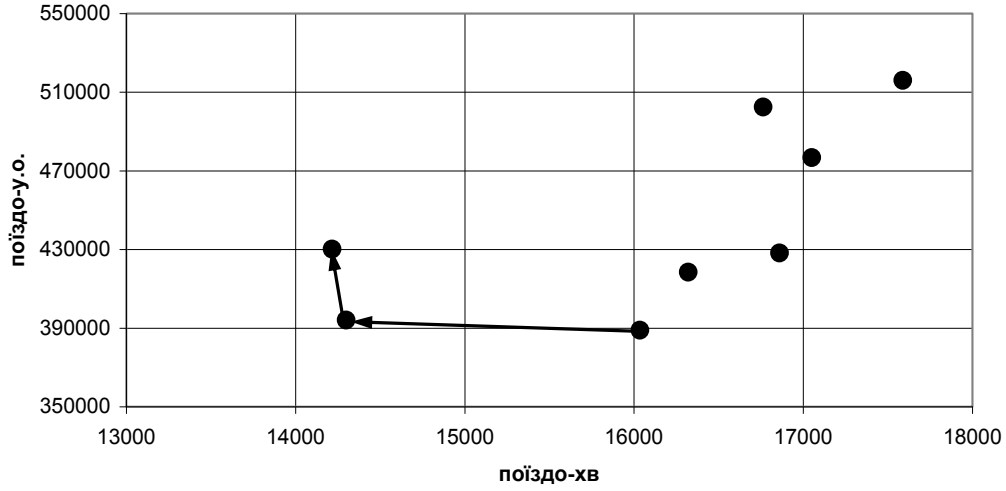


Рис. 3.6 – Графічне представлення незрівнянних варіантів по Парето

3.4 Побудова імітаційної моделі раціонального розподілу поїздопотоків по залізничній мережі

Для вирішення завдання раціонального розподілу поїздопотоків на залізничній мережі будемо використовувати векторний критерій, компонентами якого обираємо наступні показники: тривалість руху поїздів в межах залізничної мережі та сумарна величина витрачених ресурсів на пропуск поїздів.

3.4.1 Побудова моделі залізничної мережі та визначення цільової функції

В даній постановці модель залізничної мережі формалізована на основі

мультиграфу (рис. 3.7). Мультиграф – це граф, у якому між двома заданими вершинами може бути декілька дуг. Дуги, що з'єднують одну й ту ж пару вершин, прийнято називати паралельними. Мультиграф будемо задавати наступним чином: $G(V,E)$, де V – пункти мережі, тобто станції, E – список дуг (відповідні колії) між пунктами.

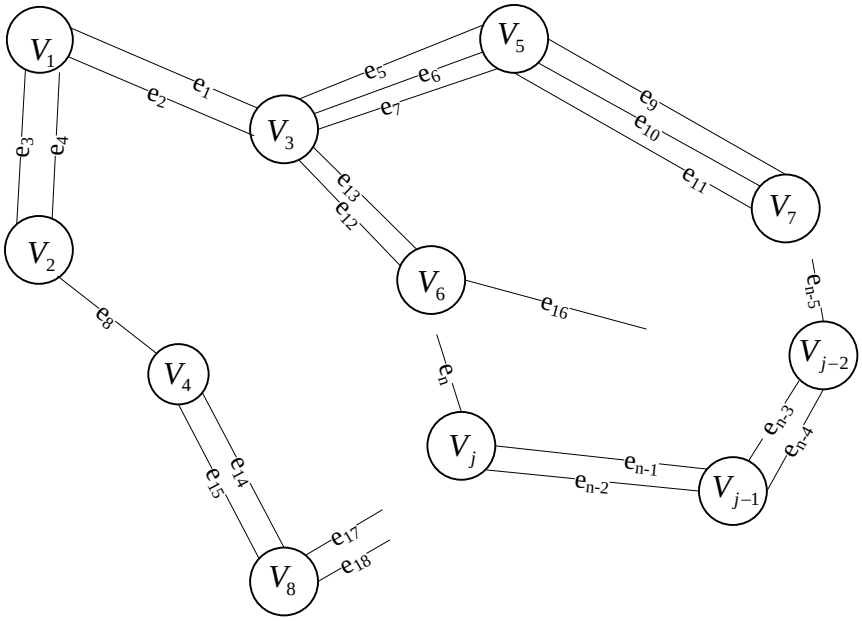


Рис. 3.7 – Модель залізничної мережі

Зауважимо, що кількість дуг в ребрі між вершинами може бути різною, за даних умов – від однієї до трьох. Тобто, кожна дуга інтерпретується як одна колія. Таким чином, з’являється можливість врахувати багатоколійність перегонів між станціями.

Вихідні дані та їх позначення:

- e_n – дуга, $e_n \in E$;
- $t(e_n)$ – час руху поїзда по дузі e_n;
- $r(e_n)$ – витрати ресурсів при русі поїзда по дузі e_n;
- $l(e_n)$ – довжина дуги e_n;
- $N(e_n)$ – пропускна спроможність дуги e_n.

Вхідною інформацією є задані поїздопотоки на графі $G(V,E)$ – P_{ij} $i, j \in V$., відповідно з вершини i в j – парний напрямок та навпаки з j в i – непарний напрямок.

При розв’язанні задачі з визначення оптимальних маршрутів руху поїздо-

потоків виникає необхідність розбиття задачі на окремі підзадачі. Декомпозиція задачі на підзадачі полегшить реалізацію головного завдання. У даному випадку можна виділити такі основні підзадачі:

– побудова всіх простих допустимих маршрутів між станціями;
– розподіл поїздопотоку по отриманим маршрутам.

При цьому кожна підзадача може складатися з окремих простіших підзадач. Задача з визначення оптимальних маршрутів руху по залізничній мережі та раціонального розподілу поїздопотоків по цим маршрутам між відповідними пунктами представлена у вигляді задачі векторної оптимізації за двома параметрами – часом руху ($Pt(x)$) та витратою ресурсів на переміщення поїзда ($\mathrm{Pr}(x)$). Кожен з показників бажано звести до мінімуму, формальний запис цієї вимоги представляє собою наступний вираз:

$$\begin{pmatrix} \mathrm{Pr}(x) \\ \mathrm{Pt}(x) \end{pmatrix} \to \min \tag{3.11}$$

Таким чином, розподіл поїздопотоків будемо виконувати за векторним критерієм, який дозволяє врахувати одночасно два фактори, а оптимізаційна задача полягає в пошуку таких значень поїздопотоків по дільницям залізничної мережі, які одночасно забезпечують мінімум двох зазначених компонентів.

3.4.2 Визначення обмежень при розподілі поїздопотоків

При розподілі поїздопотоків необхідно враховувати обмеження з пропускної спроможності дільниць:

$$N(e) \le \bar{N}(e),\ e \in E. \tag{3.12}$$

де $N(e)$ – сумарний поїздопотік для ребра e;

$\bar{N}(e)$ – максимально допустимий потік для ребра e.

Загальний потік по даному ребру e дорівнюватиме

$$N(e) = \sum_{i,j \in V} \sum_{\omega \in W_{ij}} X_{ij\omega} \cdot I_{\omega}(e);\ e \in E, \tag{3.13}$$

де $X_{ij\omega} > 0$ – поїздопотік з вершини i у вершину j по шляху ω;

$I_{\omega}(e)$ – індикатор ребра e.

Враховуючи те, що на залізничній мережі існують різні категорії поїздів,

то необхідно врахувати їх кількість з відповідними значеннями коефіцієнта зняття. Таким чином, обмеження з пропускної спроможності приймає наступний вигляд:

$$N_н \geq N_{вантj} + N_{пасj} \cdot \varepsilon_{пас} + N_{зб}(\varepsilon_{зб} - 1) \tag{3.14}$$

де $N_{вант}$, $N_{пасj}$, $N_{зб}$ – кількість вантажних, пасажирських та збірних поїздів на *j*-му напрямку; $\varepsilon_{пас}, \varepsilon_{зб}$ – коефіцієнти зняття вантажних поїздів пасажирськими та збірними відповідно.

Коефіцієнти зйому, в свою чергу, також залежать від параметрів поїздопотоків. Для двоколійних дільниць з пасажирським рухом до 60 пар поїздів на добу коефіцієнт зняття вантажних поїздів пасажирськими розраховується за формулою:

$$\varepsilon_{пас} = \frac{t_{ван}(1-\Delta)(0,8-0,005n_{пс})}{I} + 1,3, \tag{3.15}$$

а при більш значних розмірах руху пасажирських поїздів – за формулою:

$$\varepsilon_{пас} = \frac{t_{ван}(1-\Delta)(0,8-0,005n_{пс})}{I} + \frac{1,5}{n_{пс}} + 1, \tag{3.16}$$

де $t_{ван}$ – тривалість руху вантажного поїзду через обмежуючий перегін, хв.;

Δ – співвідношення чистого часу руху пасажирських та вантажних поїздів на розрахунковій дільниці;

$n_{пс}$ – загальна кількість пасажирських поїздів на дільниці; I – розрахунковий міжпоїзний інтервал на дільниці, *хв*.

Отже, маючи задачу векторної оптимізації, задану у вигляді (3.11), в якій $\mathrm{Pt}(x)$ – тривалість руху поїздів по відповідній залізничній дільниці (дузі графа), а $\mathrm{Pr}(x)$ – витрати ресурсів на переміщення поїзда по цій дузі, то компоненти вектора оптимізації приймають наступний вид:

$$\mathrm{Pt}(x) = \sum_{i,j \in V} \sum_{w \in W_{ij}} t(w) X_{ijw}, \tag{3.17}$$

$$\mathrm{Pr}(x) = \sum_{i,j \in V} \sum_{w \in W_{ij}} R(w) X_{ijw}, \tag{3.18}$$

де $t(w)$ – час руху по шляху w, та $R(w)$ – витрати ресурсів по шляху w,

за умови $X_{ijw} \geq 0$.

А загальний поїздопотік мережі можна знайти із виразу:

$$\sum_{\omega \in W_{ij}} X_{ij\omega} = P_{ij} \quad i = \overline{1, n-1},\ i+1 \leq j \leq n. \tag{3.19}$$

Враховуючи при цьому обмеження з пропускної спроможності

$$N(e) \leq \bar{N}(e),\ e \in E \text{ де } N(e) = \sum_{i,j \in V} \sum_{\omega \in W_{ij}} X_{ij\omega} \cdot I_{\omega}(e);\ e \in E, \tag{3.20}$$

можемо сформулювати алгоритм розв'язку задачі раціонального розподілу поїздопотоків по дільницях мережі.

При цьому, математична постановка задачі вибору раціональних маршрутів пропуску поїздів полягатиме у пошуку таких значень величини поїздопотоку X_{ijw} по кожному шляху, при яких виконуються умови:

$$\begin{pmatrix} \mathrm{Pt} = \sum_{i,j \in V} \sum_{\omega \in W_{ii,j}} X_{ijw} \cdot T(\omega) \\ \mathrm{Pr} = \sum_{i,j \in V} \sum_{\omega \in W_{ii,j}} X_{ijw} \cdot R(\omega) \end{pmatrix} \to min \tag{3.21}$$

при наступних обмеженнях:

$$\begin{cases} X_{ijw} \geq 0 \\ \bar{N}(e) \leq N(e), e \in E \\ N_{\text{вантj}}(e) \leq N(e) - N_{\text{пасj}}(e) \cdot \varepsilon_{\text{пас}}, e \in E \end{cases} \tag{3.22}$$

3.4.3 Алгоритм розв'язку задачі раціонального розподілу поїздопотоків на мережі

При формулюванні алгоритму раціонального розподілу поїздопотоків використаємо алгоритм побудови простих шляхів на графі, описаний у пункті 3.2, а також алгоритм розподілу потоків, описаний у пункті 3.3.

Таким чином, алгоритм рішення математичної задачі вибору оптимальних маршрутів руху поїздів на залізничній мережі вказаний на рис. 3.8.

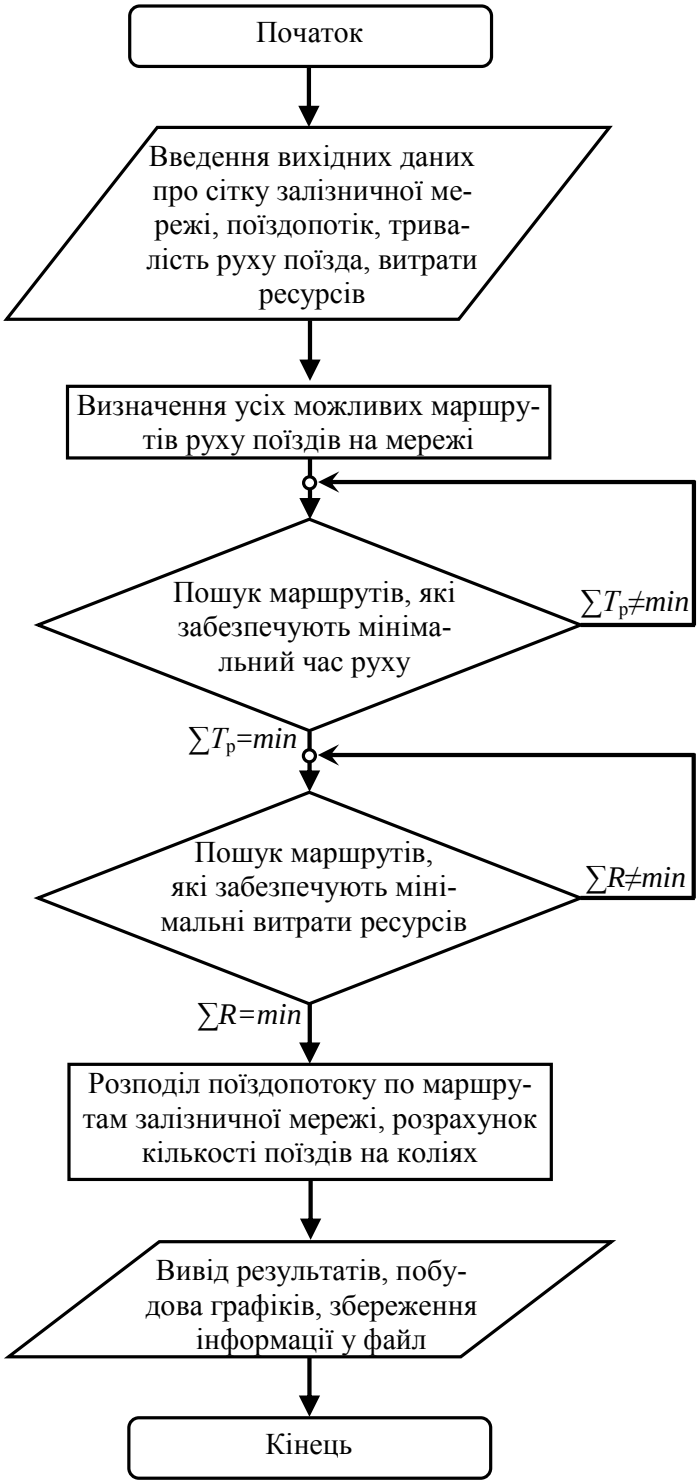


Рис. 3.8 – Алгоритм розрахунку раціональних маршрутів руху поїздів

Детально використання даного алгоритму при побудові моделі раціонального розподілу поїздопотоків по залізничній мережі наведено в [105]. Зазначена модель дозволяє виконувати розподіл потоків по маршрутам на основі векторної оптимізації. Модель складається з блоків, взаємодія яких із людиною-оператором, що виконує моделювання, наведена на рис. 3.9. Реалізацію алгоритму раціонального розподілу поїздопотоків по залізничній мережі наведено у

Додатку Б.

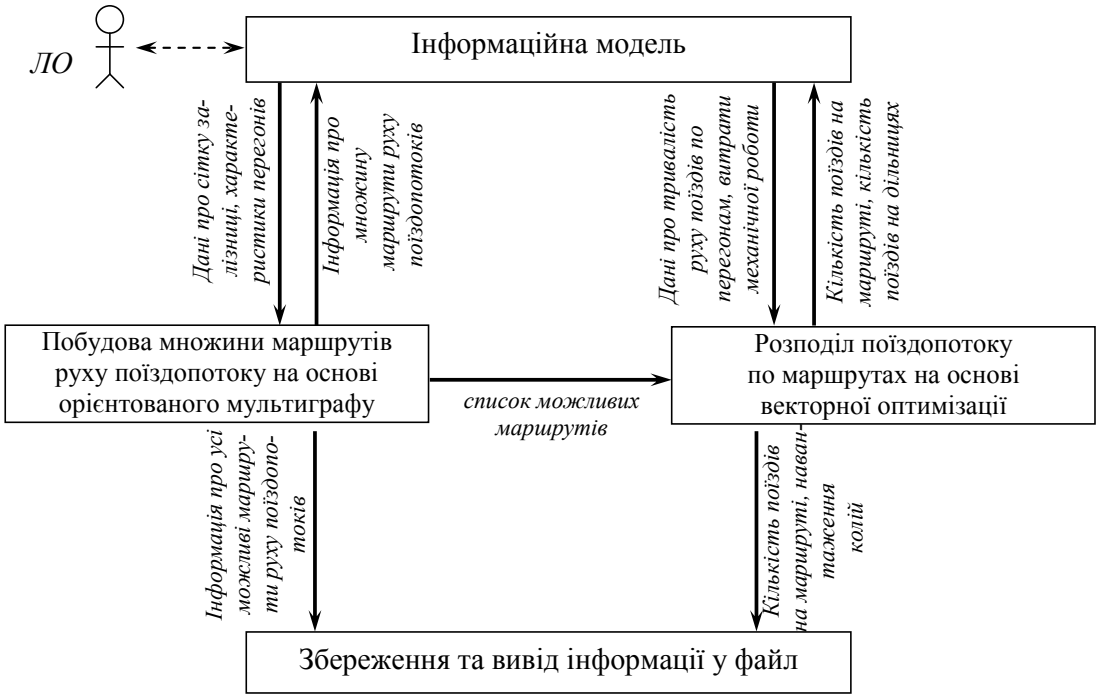


Рис. 3.9 – Послідовність визначення оптимальних маршрутів руху поїздів

3.4.4 Визначення раціонального розподілу поїздопотоків по дільницям залізничної мережі

При введенні даних до моделі розподілу поїздопотоків необхідно зазначити інформацію про сітку залізничної мережі, станції та кількість колій між ними з метою представлення залізничної мережі у вигляді мультиграфу (див. п. 3.4.1). Також необхідно ввести дані про поїздопотік залізничної мережі та пропускну спроможність її дільниць. Слід зазначити, що пропускну спроможність необхідно задавати у моделі з урахуванням кількості пасажирських поїздів, у відповідності до умови (3.20).

Таким чином, вихідні дані, які вводяться до моделі розподілу поїздопотоків у діалоговому режимі, наступні:

– назви станцій залізничної мережі;
– далі зі списку введених назв станцій обираються усі суміжні станції;
– число колій між обраними станціями;
– напрям руху по колії (парний/непарний);
– середній час руху поїзда по колії (*хв*);
– пропускна спроможність колії;

– витрати ресурсів при русі поїзда;

– поїздопотік між станціями по всій залізничній мережі.

Приклад введення даних до моделі наведено на рис. 3.10.

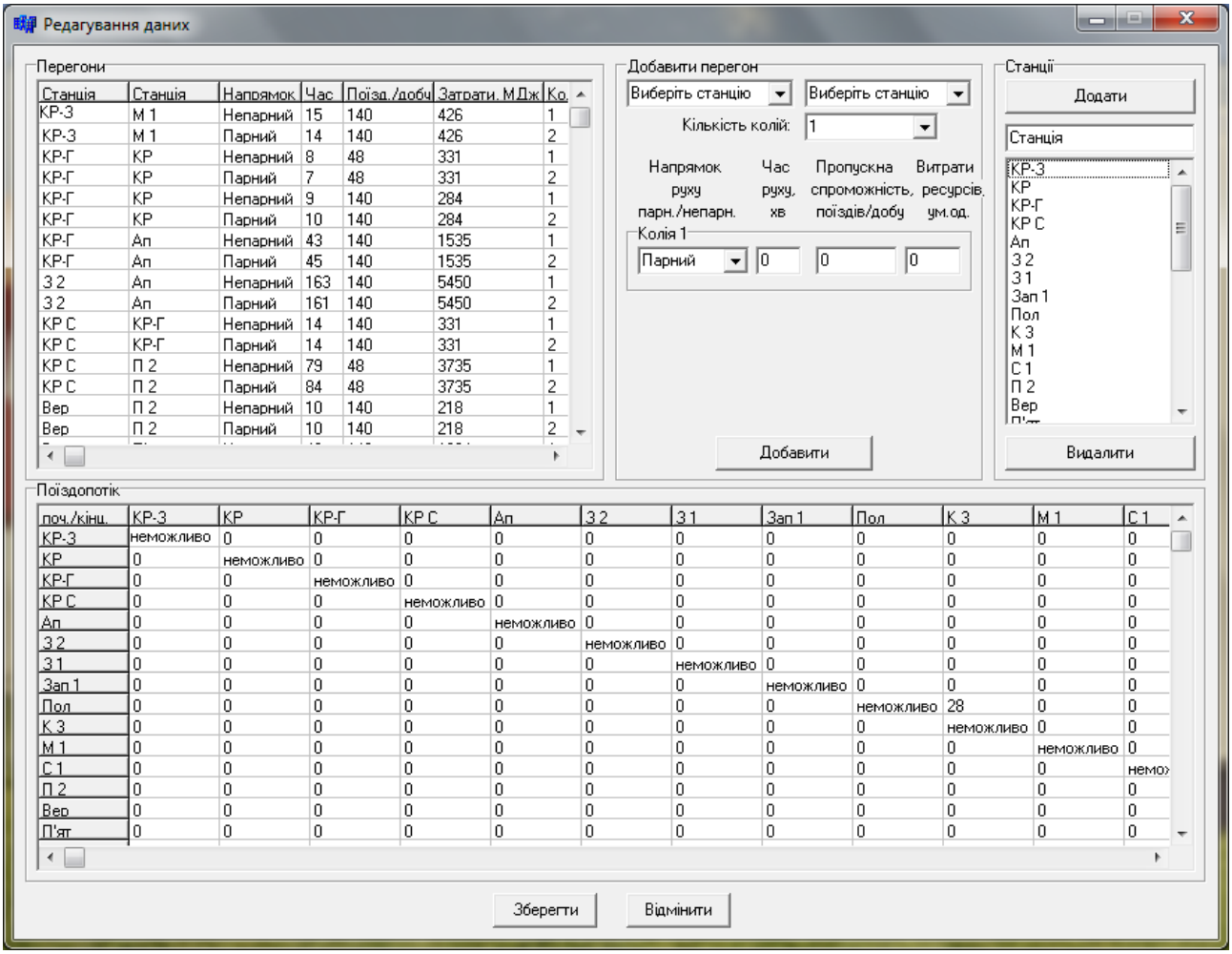


Рис. 3.10 – Введення даних до моделі розподілу поїздопотоків

Результатом роботи моделі раціонального розподілу поїздопотоків по залізничній мережі є список усіх оптимальних маршрутів та значення поїздопотоку, який реалізується на кожному з маршрутів, а також графік залежності витрат ресурсів від витрат часу для всієї залізничної мережі.

Дана модель дозволяє розрахувати оптимальний розподіл поїздопотоків та сумарне значення компонентів вектора (3.19).

Один із варіантів розподілу поїздопотоку по залізничній мережі, сумарні значення компонентів якого складають $104{,}58 \cdot 10^3$ *поїздо-хв* та $30{,}862 \cdot 10^5$ *у.о.*, наведено на рис. 3.11.

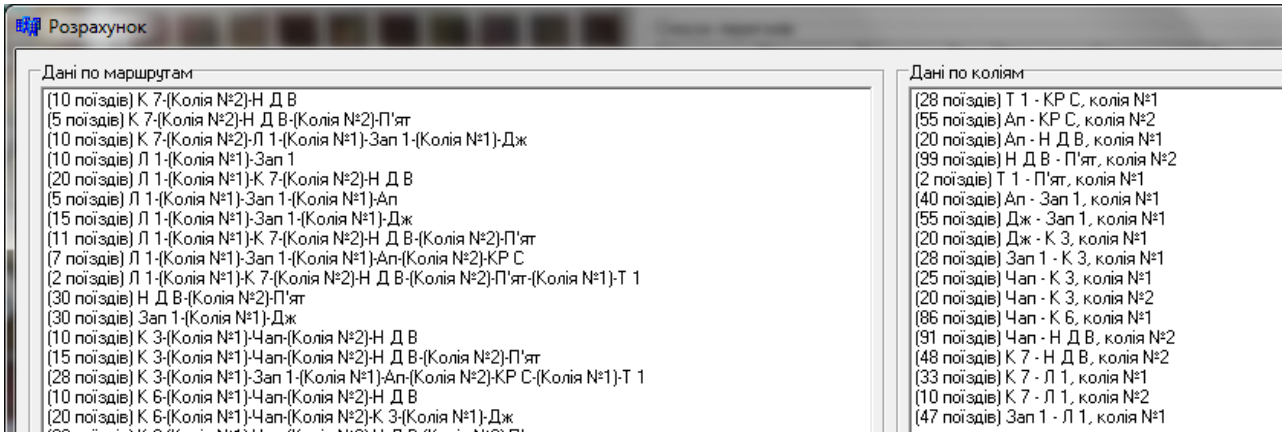


Рис. 3.11 – Розподіл поїздопотоку по залізничній мережі

У табл. 3.5 зведено 15 варіантів розподілу поїздопотоків із можливої множини, а їх графічне представлення зображено на рис. 3.12.

Таблиця 3.5 – Варіанти розподілу поїздопотоків по залізничній мережі

Варіант можливого розподілу поїздопотоку	Сумарні витрати часу на пропуск поїздопотоку, 10^3 *поїздо-хв*	Сумарні витрати ресурсів на пропуск поїздопотоку, 10^3 *у.о.*
1	104,48	31,488
2	104,37	30,506
3	104,42	31,734
4	103,92	31,676
5	104,78	31,095
6	103,90	32,206
7	103,86	31,688
8	104,48	31,488
9	105,05	31,325
10	103,72	31,703
11	102,42	31,740
12	103,94	31,095
13	103,22	31,137
14	103,86	31,688
15	104,58	30,862

Таким чином для залізничної мережі із множини варіантів розподілу було отримано 4 оптимальних за Парето, які наведені на рис. 3.12. Кожен з цих варіантів характеризується довжиною вектора оптимізації. В залежності від задачі, що ставиться, можна звести до мінімуму один із параметрів вектора оптимізації і при цьому розрахувати інший. Наприклад, при виборі варіанту з мінімальним часом пропуску поїздопотоків $\sum NT_{\min} = 102,42 \cdot 10^3$ *поїздо-хв* необхідно витрати $\sum NC = 31,740 \cdot 10^5$ *у.о.* ресурсів.

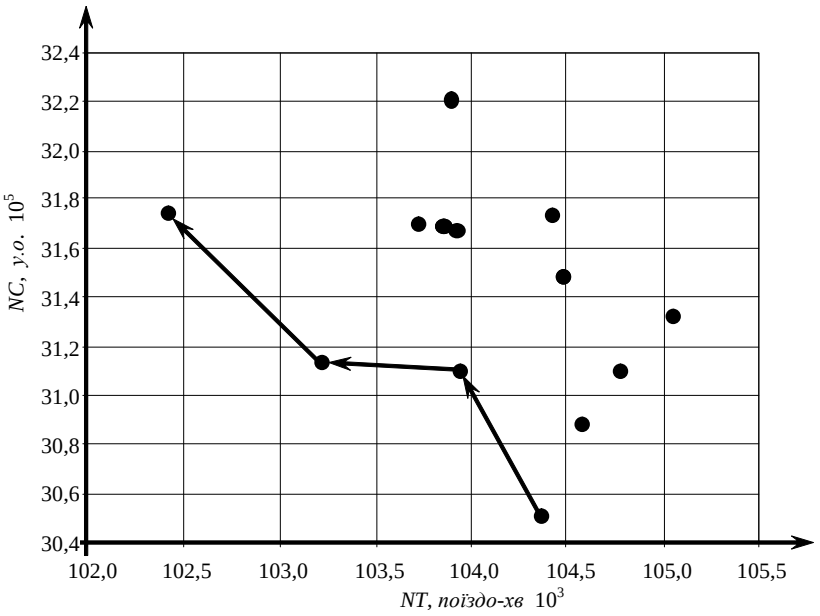


Рис. 3.12 – Графічне представлення незрівнянних варіантів розподілу поїздопотоків по Парето

Представлений алгоритм дозволяє отримати оптимальний розподіл поїздопотоку для будь-якої залізничної мережі, тобто процедура розподілу поїздопотоку є універсальною. Слід зазначити, що запропонована модель раціонального розподілу поїздопотоків по залізничній мережі дозволить зменшити витрати ресурсів на пропуск поїздів та зменшити тривалість їх руху по розгалуженому залізничному полігону.

РОЗДІЛ 4
ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНОГО НАПРЯМКУ

В умовах ринкової економіки та конкуренції з іншими видами транспорту важливим фактором забезпечення високої ефективності експлуатаційної роботи залізниць є адаптація технології до обсягів та структури вантажопотоків та вимог ринку транспортних послуг. Головними критеріями, що визначають вибір виду транспорту для переміщення вантажів, є вартість та тривалість перевезення. Ці критерії є суперечливими і покращення одного з них найчастіше призводить до погіршення іншого. З метою оцінки критеріїв роботи залізниць як функції параметрів поїздопотоків побудовано імітаційну модель залізничного напрямку.

Для мінімізації часу знаходження вагонів на станціях та під час переміщення, залізничні станції та дільниці повинні мати достатній резерв пропускної і переробної спроможності для погашення пікових навантажень, які виникають у насправді відомі моменти часу. Так, наприклад для Кримського напрямку перевезень, таким періодом є червень – серпень кожного року, оскільки на цей час припадає різке збільшення пасажирського поїздопотоку і одночасно збільшуються обсяги місцевої роботи, що пов’язано із навантаженням продукції агропромислового комплексу. З іншого боку, необхідно мінімізувати власні витрати залізниці, скорочуючи витрати на утримання власної інфраструктури, які не залежать від обсягів роботи. Для рішення вказаної складної та суперечливої задачі необхідна достовірна кількісна оцінка конструкції та технології роботи залізничних напрямків. Ефективним засобом аналізу та оцінки показників їх функціонування є імітаційне моделювання процесів перевезення.

4.1 Загальна структура імітаційної моделі роботи залізничного напрямку

Залізничний напрямок представляє собою систему масового обслуговування (СМО), підсистемами якої виступають технічні станції та дільниці. Розроблена система математичних моделей є ієрархічною і включає мікро- та макрорівні.

На мікрорівні об’єктом дослідження є процес переробки транзитних ва-

гонопотоків та формування поїздопотоків на сортувальних і дільничних станціях напрямку. Модель технології формування поїздів дозволяє використовувати різні параметри маси та довжини. На макрорівні об'єктом дослідження виступає процес пропуску поїздопотоків по залізничному напрямку, що являє собою СМО, окремими фазами якої є станції та дільниці. Тому зміна параметрів вагоно- та поїздопотоків і технології роботи впливає на завантаження залізничних об'єктів та виконавців, на міжопераційні простої та тривалість знаходження рухомого складу в окремих фазах обробки та в СМО взагалі. Суттєвий вплив ці фактори також мають і на експлуатаційні витрати. В зв'язку з цим, в дослідженнях вирішена задача побудови адекватних функціональних моделей залізничних напрямків для дослідження та оптимізації техніко-експлуатаційних показників їх роботи. Основними методами дослідження є методи імітаційного моделювання, теорія скінченних автоматів та тягові розрахунки.

Імітаційна модель залізничної станції на мікрорівні (рис. 4.1) включає універсальні моделі технологічного процесу станції (МТП), інформаційну модель (ІМ) та модель системи управління (МСУ). При цьому використовується технологія ергатичного моделювання залізничних станцій [70–71], що передбачає можливість безпосередньої участі у процесі моделювання особи, яка приймає рішення (ОПР), для виконання функцій маневрового диспетчера, або чергового по станції. Альтернативою ергатичному моделюванню є модель системи управління, що передбачає усі можливі сценарії технології роботи об'єкту.

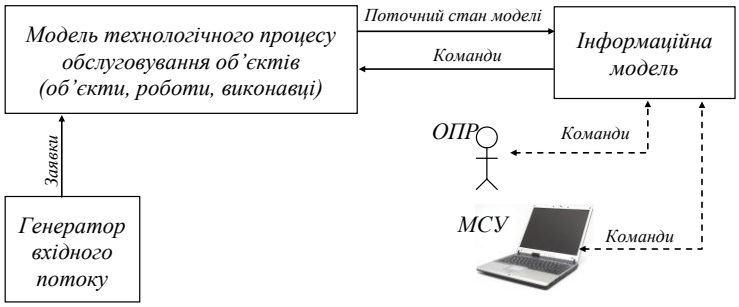


Рис. 4.1 – Загальна структура імітаційної моделі технічної станції

Отримані у другому розділі закони розподілу маси поїздів, параметрів потоку використані для побудови імітаційної моделі залізничного напрямку на макрорівні досліджень. До її складу входять модель технологічного процесу

обслуговування об’єктів (МТП) та інформаційна модель (ІМ). Синхронізація МТП та ІМ виконується за командами системного таймера у відповідності з системним часом t_c. Загальний алгоритм моделі зображено на рис. 4.2.

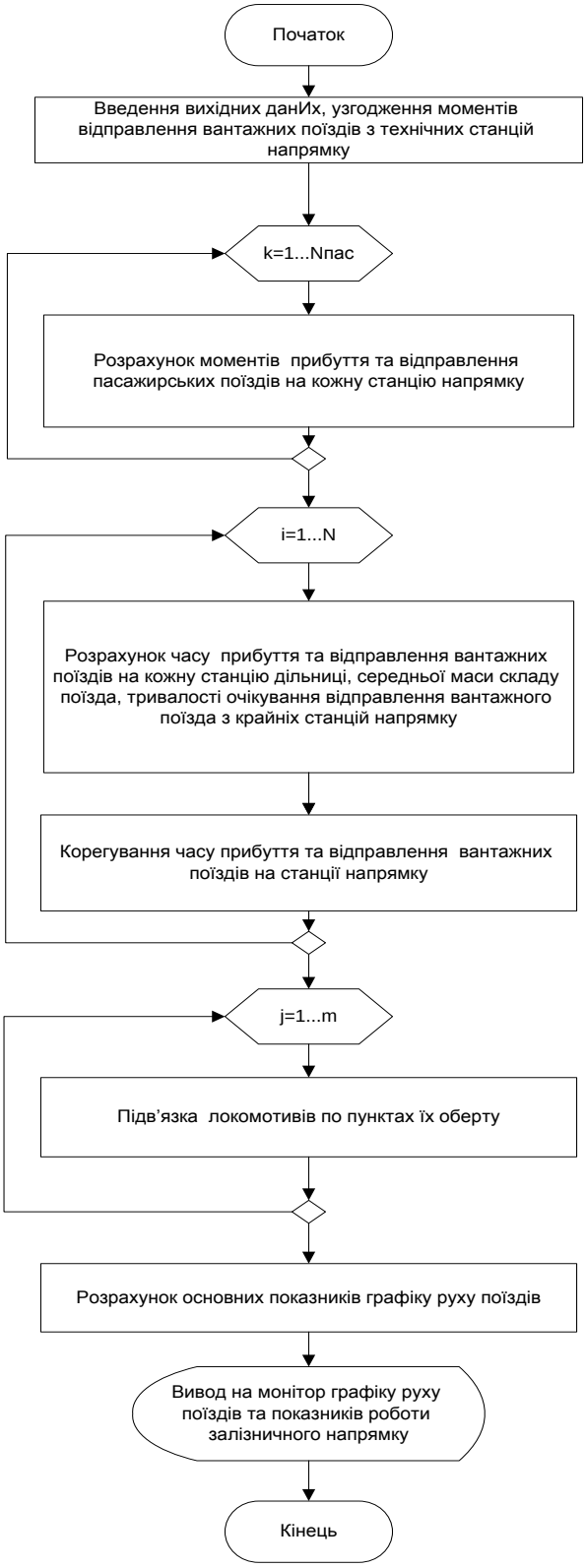


Рис. 4.2 – Загальний алгоритм імітаційної моделі залізничного напрямку

В МТП залізничного напрямку вхідний потік утворюють парні та непарні поїзди, що вимагають пропуску по дільницям напрямку. Фазами обслуговуван-

ня поїздів є залізничні перегони та станції, що здійснюють технологічні процеси відповідно до технології роботи дирекції залізничних перевезень та технологічних процесів роботи станцій напрямку. Тривалості обслуговування моделюються як випадкові величини, параметри яких залежать від характеристик заявок на обслуговування та об'єктів обслуговування.

В якості об'єктів, що обслуговуються на дільницях, розглядаються поїзди та поїзні локомотиви. Кожен об'єкт в моделі представляється структурою

$$O_j = \{I_0, a_o, P, s, n_0\},\ j = 1, 2, ..., n_0, \tag{4.1}$$

де I_0 – ідентифікатор об'єкту;

a_o – тип об'єкту;

P – множина параметрів об'єкту;

s – поточний стан об'єкту, який визначає фазу технологічного процесу його обслуговування;

n_0 – загальна кількість об'єктів, що обслуговуються в парку.

Згідно технологічного процесу в моделі передбачено можливість поділу поїздів на состави та поїзні локомотиви, що мають різну технологію обслуговування на технічних станціях, де відбувається зміна локомотивів.

4.2 Моделювання вхідного потоку поїздів

Вхідний потік заявок подається в окремому файлі, що характеризується визначеною структурою (додаток Г).

На першому етапі в модель подаються моменти надходження пасажирських поїздів в систему , (код 3 3 33 *6* …) їх номери-ідентифікатори (1525 *101*) та підхід надходження (1011 *1*); на другому етапі інформація про вхідний потік вантажних поїздів (код 3 3 33 1 …) в такому ж ключі; і на третьому етапі – параметри вантажних поїздів (3 3 46 L 3501 *4 0 3 25 16 14 6 7*), що стосуються напрямку слідування вагонів в процесі розформування составу.

Момент прибуття вантажних поїздів визначається за формулою

$$T_i = T_{i\text{-}1} + t_i, \tag{4.2}$$

де t_i – інтервал між поїздами, $T_0 = 0$.

Інтервал між поїздами моделюється за законом Ерланга, згідно

досліджень, що виконані в другому розділі. Враховуючи те, що розподіл Ерланга може давати значення інтервалу між поїздами наближені до нуля, що неможливо в реальних умовах через функціонування засобів автоблокування, то для моделювання використано модифікований розподіл Ерланга, при якому величина t_i визначається за допомогою виразу

$$t_i = \frac{I_{\min} - M[t]}{k} \ln \prod_{i=1}^{k} r_i + I_{\min}, \tag{4.3}$$

де $I_{\min}$ – мінімальний інтервал між поїздами, що встановлюється вимогами автоблокування;

r – випадкове число, що рівномірно розподілене в інтервалі [0, 1].

Рух пасажирських поїздів в моделі відбувається відповідно графіку руху дільниць напрямку.

Моделювання напрямку слідування вагонів вантажних поїздів по напрямках виконується з використанням окремої моделі *SOSTAW*. Вихідними даними є обсяги вагонопотоків по напрямкам, довжина та кількість поїздів.

Моделювання кількості груп в составах вантажних поїздів відбувається наступним чином. Під групою m розуміються вагони поїзда, які мають одне призначення плану формування, при цьому значення m знаходиться у діапазоні $2 \le m \le k$, *де* k - кількість призначень плану формування. Для визначення кількості груп в составі поїзда використовується методика статистичного моделювання [120]:

$$m_i = \sum_{j=1}^{k} Z_j \text{ де} \begin{cases} Z_j = 1, \text{ якщо } r_j < p \\ Z_j = 0, \text{ якщо } r_j \ge p \end{cases}, \tag{4.4}$$

де p – ймовірність появи нової групи вагонів у составі.

У випадку якщо $m < 2$ моделювання повторюється з наступним набором випадкових чисел.

Кількість вагонів в групах моделюється як рівномірно розподілена випадкова величина [120]:

$$n_i = N_{\min} + \lfloor (N_{\max} - N_{\min} + 1) r_i \rfloor \tag{4.5}$$

де $\lfloor x \rfloor$ – операція здобуття цілої частини числа x;

$N_{\min}$, $N_{\max}$ – відповідно найменше та найбільше значення випадкової вели-

чини кількості вагонів в групі.

При $N_{\min}$=1 формула (4.5) спрощується і має вигляд

$$n_i = 1 + \lfloor N_{\max} r_i \rfloor. \tag{4.6}$$

Приклад файлу моделювання напрямку слідування вагонів у составі наведено в додатку Г.

4.3 Модель залізничного напрямку

Модель залізничного напрямку є інструментом дослідження на макрорівні. Мета її створення полягає у визначенні показників роботи залізниці як функції параметрів поїздопотоків. З моделлю мікрорівня вона пов'язана моментами надходження та відправлення поїздів на технічні станції напрямку.

В МТП технологія пропуску поїздів по перегонах представляється структурою:

$$q_{\text{j}} = \{I_w, I_0, p, U_q, F_q, t_q\}, i = 1, 2, ..., n_q \tag{4.7}$$

де I_w – ідентифікатор шаблону технологічної операції;

I_0 – об'єкт з яким виконується операція;

U_q – список перегонів;

F_q – список умов закінчення технологічної операції;

t_q – момент закінчення виконання технологічної операції.

Шаблони w_i містять інформацію, яка необхідна для параметризації окремих технологічних операцій q:

$$w_i = \{I_w, f_t, \zeta\}, i = 1, 2, ..., n_w, \tag{4.8}$$

f_t – функція, що визначає тривалість руху поїзда по перегону, визначається відповідно до тягових розрахунків;

ζ – параметр, що вказує на порядок відправлення поїздів на перегін ($\zeta = 1$ – поїзд займає перегін, $\zeta = 0$ – поїзд зупиняється для обгону поїздом іншої категорії).

Моделювання технологічних операцій виконується в три етапи. Першим етапом (s_q=0) є очікування звільнення всіх необхідних виконавців. Перелік таких виконавців визначається шаблоном технологічної операції I_w. По закінчен-

ню першого етапу у відповідністю з шаблоном I_w розраховується час закінчення технологічної операції t_q. На другому етапі (s_q=1) виконується моделювання часу, необхідного для виконання операції. Другий етап закінчується в момент, коли $t_c > t_q$. Третій етап (s_q=2) триває до тих пір, поки не будуть виконані всі умови закінчення технологічної операції $\mathbf{F}_q$.

Прийнято, що кожну елементарну операцію повинні виконувати виконавці певної спеціалізації. В той же час виконавець даної спеціалізації може виконувати декілька різних елементарних операцій. Станційні колії та стрілочні зони розглядаються також як окремі виконавці робіт.

Кожний виконавець, який працює на станції в МТП, представляється структурою:

$$E_k = \{I_e, \boldsymbol{N}_e, \gamma, g_e\},\ k = 1, 2,..., n_e, \tag{4.9}$$

де I_e – ідентифікатор виконавця;

$\boldsymbol{N}_e$ – назва виконавця;

g_e – покажчик активності виконавця;

n_e – загальна кількість виконавців, які приймають участь в ТП станції.

Виконавець E_k вважається зайнятим, якщо в поточний момент часу він виконує деяку технологічну операцію (знаходиться у списку $\mathbf{U}_q$) або знаходяться в очікуванні виконання наступних операцій з цим же об’єктом (список $\mathbf{U}_o$). Для врахування вільних виконавців в МТП введено динамічний список $\mathbf{U}_r = \{I_{e1}, I_{e1},..., I_{em}\}$, де m – загальна кількість вільних виконавців. Він містить в якості елементів ідентифікатори виконавців, що не зайняті виконанням якої-небудь операції в поточний момент системного часу t_c. Список $\mathbf{U}_r$ змінюється в процесі моделювання роботи напрямку при зайнятті чи звільненні виконавців. Порядок звільнення виконавців визначається параметром ζ: якщо ζ=0, то виконавець після закінчення технологічної операції очікує виконання наступної операції з цим же об’єктом (ідентифікатор виконавця I_e зі списку $\mathbf{U}_q$ заноситься у список $\mathbf{U}_o$ відповідного об’єкта); якщо ζ=1, то виконавець після виконання операції звільняється (I_e записується в список $\mathbf{U}_r$). На початку моделювання всі виконавці вважаються вільними ($m = n_e$).

Технологічний процес обслуговування об'єктів кожної категорії (паса-

жирські поїзди, вантажні поїзди у розформування, транзитні і т.і.) формалізований на основі відповідного скінченого автомата (СА), який забезпечує виконання з кожним об'єктом всього комплексу технологічних операцій у відповідності з їх взаємною обумовленістю:

$$A = \{X, Z, S, F_z, F_s\}, \tag{4.10}$$

де X, Z – відповідно, вхідний та вихідний алфавіт;

S – множина станів автомата;

F_z, F_s – функції виходів і переходів.

Вхідний алфавіт X автомата включає три підмножини вхідних сигналів: $X = \{X_1, X_2, X_3\}$,

X_1, – зовнішні команди, які поступають від ОПР чи МСУ для ініціалізації певних технологічних операцій з об'єктом;

X_2 – внутрішні сигнали, що надходять від об'єкта після закінчення кожній технологічної операції;

X_3 – внутрішні сигнали, що надходять від об'єкта при виникненні експлуатаційних подій.

Кожному символу z_i вихідного алфавіту Z ставиться у відповідності функція Ψ_i, яка повинна бути виконана в момент надходження в СА вхідного сигналу x_i. Функції Ψ_i включає набори команд двох типів $\Psi_i = \{K_{i1}, K_{i2}\}$,

K_{i1} – список команд ініціалізації окремих технологічних операцій з об'єктом;

K_{i2} – список команд і повідомлень, які повинні бути передані структурним моделям.

Елементами вхідного та вихідного алфавітів кожного СА є зовнішні (від ОПР) та внутрішні (від структурних підсистем МТП) команди.

Кожний стан автомата $s_o \in S$ відповідає певному стану ТП обслуговування об'єкта як і в мережевому плануванні, який характеризується ступенем завершеності усіх технологічних операцій. Обслуговування окремого об'єкта на станції моделюється послідовністю переходів СА з одного стану в інший, по мірі виконання передбачених технологічним процесом операцій. На початку моделювання обслуговування об'єкта відповідний СА знаходиться в початковому

стані s_0. Після виконання всіх операцій, що передбачені ТП, автомат переходить в кінцевий стан $s_к$, після чого відповідний об'єкт виключається із системи обслуговування.

Функції виходів F_z і переходів F_s автомата A виконують перетворення вхідної послідовності сигналів $\mathbf{x}_j=\{x_1, x_2,\ldots x_к\}$ у відповідну вихідну послідовність $\mathbf{z}_j=\{z_1, z_2,\ldots z_к\}$. Для формалізації різних варіантів технології обслуговування деякого об'єкта використовуються різні вхідні послідовності $\mathbf{x}_j$, $j = 1\ldots r$, кожна із яких переводить КА із стану s_0 в стан $s_к$; вибір послідовності $\mathbf{x}_j$ здійснюється ОПР.

Для ідентифікації необхідного об'єкту дослідження в моделі, перегони напрямку в МТП передаються із окремого файлу у вигляді структури

$$D_j = \left\{ I_j, l_{j,} t_p, V_{\min}, Sb_j, Se_j \right\}, \tag{4.11}$$

де I_j – ідентифікатор (назва) перегона,

$l_{j,}$ – його довжина, км,

t_p – тривалість руху на перегоні пасажирських поїздів,

$V_{\min}$ – обмеження швидкості руху поїздів, км/год, якщо відсутнє, то $V_{\min}$ =0,

Sb_j, Se_j – координата початку та кінця дії обмеження швидкості, м.

Вихідні дані для моделі залізничного напрямку знаходяться в текстових файлах «test.dat» і «pas.dat» (додаток Д).

4.3.1 Моделювання руху вантажних поїздів по дільниці

Для моделювання руху вантажних поїздів по дільницям напрямку була використана модель руху поїзда з розподіленою масою вздовж поїзда [63, 121–122].

Параметри руху поїзда: швидкість v, тягові характеристики F_m, гальмівна силу B повинні задовольняти рівняння:

$$\frac{d^2\vec{s}}{dt^2} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{(1+\gamma)(\vec{F}_m \pm \vec{W}_k - \vec{B})}{Q+P} \tag{4.12}$$

при ряді обмежень, викладених в [63, 121], в тому числі:

$$v \le v_m(s), \tau_\infty(1-e^{t/T}) + \tau_0 e^{t/T} \le T_m \tag{4.13}$$

де Q – маса состава поїзда,

P – маса локомотива,

τ_0 – різниця між температурою обмоток тягових двигунів і температурою повітря τ_∞,

T – значення теплових параметрів, що залежать від величини струму, який використовує тяговий двигун,

T_m – максимально допустима температура нагрівання обмоток тягових двигунів,

γ – коефіцієнт обертових мас поїзда,

$\vec{W}_k$ – сумарна сила опору руху поїзда.

Модель руху поїзда дозволяє враховувати обмеження швидкості руху в кривих, зменшення зчеплення і відповідне зменшення сили тяги в кривих малих радіусів та детально підрахувати витрати пов'язані з рухом поїзда по мережі. Також слід зазначити, що додаткові опори від ухилу і кривих враховуються не в точці, а по усій довжині поїзду.

Параметри розрахунку дозволяють провести дослідження впливу параметрів поїздів на тривалість їх руху на дільниці. В роботі проведено моделювання руху поїздів масою від 1000 до 8500 т на пасажиро-напруженому та вантажонапружених напрямках. В додатку Е наведено приклад результатів розрахунку.

Для апроксимації залежності часу ходу вантажного поїзда по перегону від маси состава і довжини перегону на конкретному напрямку використовується метод мінімальних квадратів, що реалізований у програмі *REGRESS*. Серед запропонованих 58 різних залежностей (див. додаток Ж) для подальшого моделювання було обрано варіант з найменшою залишковою дисперсією $D_{ост}$ = 0,6912.

Таким чином, час руху вантажного поїзда по перегону в моделі визначається за формулою:

$$T_x=0{,}859+1{,}27\cdot10^{-4}Q_j+8{,}7\cdot10^{-4}L_i, \text{ хв}, \qquad (4.14)$$

де Q_j – маса составу j-го поїзда, т;

L_i – довжина i-го перегону, м.

Для перевірки адекватності такої моделі був використаний повний факторний експеримент.

Для того, щоб встановити залежність функції відгуку від двох факторів $\hat{t} = f(Q,l)$ (фактор 1 – маса составу поїзда, Q, фактор 2 – довжина перегону L), необхідно розглянути вплив кожного фактора на двох рівнях, тобто виконати $N=2^2=4$ досліди.

Загальний вид функції відгуку, що залежить від двох факторів наведений нижче:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 , \qquad (4.15)$$

або

$$\hat{t} = b_0 + b_1 \cdot \tilde{X}_1 + b_2 \cdot \tilde{X}_2 + b_{12} \cdot \tilde{X}_1 \cdot \tilde{X}_2 , \qquad (4.16)$$

Для пошуку коефіцієнтів рівняння (4.14) виконано розрахунки, результати яких представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Розрахунки коефіцієнтів функції відгуку

№ досліду	t, хв	Рівні факторів				$\tilde{X}_0 t$	$\tilde{X}_1 t$	$\tilde{X}_2 t$	$\tilde{X}_1 \tilde{X}_2 t$	Функція відгуку $\hat{t}$
		$\tilde{X}_0$	$\tilde{X}_1$	$\tilde{X}_2$	$\tilde{X}_1 \tilde{X}_2$					
1	4,45	+1	–1	–1	+1	+4,45	-4,45	–4,45	+4,45	4,45
2	5,02	+1	+1	-1	–1	+5,02	+5,02	-5,02	–5,02	5,02
3	18,71	+1	-1	+1	–1	+18,71	-18,71	+18,71	–18,71	18,73
4	19,29	+1	+1	+1	+1	+19,29	+19,29	+19,29	+19,29	19,30
∑		-	-	-	-	47,47	1,14	28,53	0,002	-

В цій таблиці $\tilde{X}_1$ та $\tilde{X}_2$ визначають рівні, відповідно, першого та другого факторів, причому при нижньому рівні значення фактора $\tilde{X}$ = –1, а при верхньому рівні $\tilde{X}$ = +1.

Коефіцієнти рівняння матимуть наступні значення:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N} \tilde{X}_{0i} \cdot t_i}{N} = \frac{47,47}{4} = 11,86 ,$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^{N} \tilde{X}_{1i} \cdot t_i}{N} = \frac{1,14}{4} = 0,285 ,$$

$$b_2 = \frac{\sum_{i=1}^{N} \tilde{X}_{2i} \cdot t_i}{N} = \frac{28,53}{4} = 7,13,$$

$$b_{12} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \tilde{X}_{12i} \cdot t_i}{N} = \frac{0,002}{4} = 0,0005.$$

З урахуванням знайдених коефіцієнтів рівняння функція відгуку прийматиме наступний вигляд

$$\tilde{t} = 11,86 + 0,285 \cdot \tilde{X}_1 + 7,13 \cdot \tilde{X}_2 + 0,0005 \tilde{X}_1 \cdot \tilde{X}_2 \qquad (4.17)$$

Для перевірки адекватності отриманої залежності визначено тривалість ходу вантажного поїзда при середніх рівнях факторів:

$$T = 0,859 + 0.000127 \cdot 6250 + 0.00087 \cdot 11743 = 11,86 \text{ хв.}$$

Функція відгуку при нульових рівнях двох факторів також дорівнює $\hat{t} = 11,86$ хв. Отже, порівнюючи отримані результати (11,86=11,86), робимо висновок про адекватність залежності (4.12). Оскільки коефіцієнти b_1 і b_2 додатні, то між функцією відгуку та двома факторами існує прямопропорційний зв'язок, тобто, збільшення будь-якого з факторів приведе до збільшення й функції відгуку $\hat{t} = f(m,l)$. Порівнюючи розраховані коефіцієнти b_1 і b_2 один з іншим, можна відзначити, що коефіцієнт b_2=7,133 в 35 разів перевищує коефіцієнт b_1=0,28, з чого слідує, що більший вплив на функцію відгуку має другий фактор, тобто довжина перегону. Проведена вище перевірка адекватності функції відгуку, дозволяє відповідно отриманим результатам говорити про її повну адекватність. Треба зазначити також, що збільшення маси поїздів, наприклад, у 3 рази з 2000 т до 6000 т призводить до збільшення тривалості руху поїзда по перегону всього на 3-5 %.

4.3.2 Порядок обслуговування об'єктів

На відміну від порядку обслуговування об'єктами в моделі мікрорівня (див п. 4.3.2: першим надійшов – першим обслуговується), організація руху поїздів на дільниці передбачає наявність однозначних пріоритетів. Нитки графіку руху вантажних поїздів можуть перетинатися з нитками руху пасажирських поїздів із-за різниці часу ходу по перегону. Для запобігання цьому модель здійснює перевірку перетинання ниток графіку руху і при необхідності корегує час

відправлення зі станції та час прибуття на наступну станцію вантажного поїзда у відповідності до вимог безпеки руху поїздів. Алгоритм здійснення перевірки і коригування часу відправлення та прибуття вантажного поїзда зображено на рис 4.3.

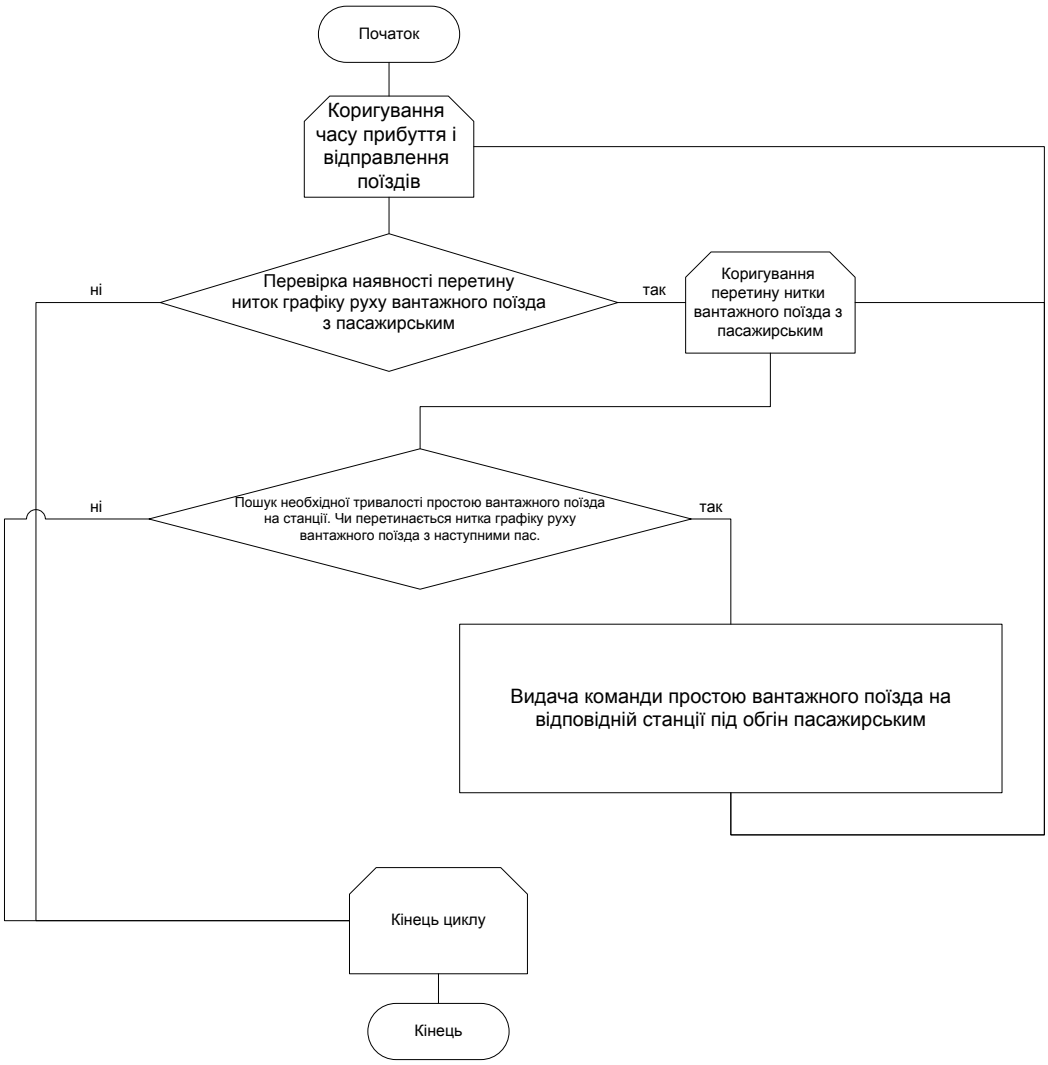


Рис. 4.3 – Алгоритм коригування моменту прибуття та відправлення вантажного поїзда

Для можливості керування процесом обслуговування об’єктів в МТП також організовано динамічний список завдань виконавців **K**, кожен елемент (перегін) якого описується структурою: $k = \{I_o, I_q, I_e\}$. При виборі виконавця p спеціалізації γ для операції q_i з об’єктом O_j виконується аналіз зайнятості елементів списку **K**. Якщо у списку є завдання, для якого $I_o(k_i)=I_o(o)$, $I_q(k_i)=I_q(q)$, $p(I_e(k_i))=p$, і це завдання k_i є першим елементом списку для виконавця I_e, то виконавець $I_e(k_i)$ призначається для виконання операції q_i з об’єктом O_j. В інших випадках, якщо виконавець I_e зустрічається у списку завдань **K**, то він вважа-

ється зайнятим і не може бути використаний для виконання технологічних операцій з іншими об’єктами. В МТП залізничного напрямку виконавцями постають перегони, об’єктами, що займають цих виконавців – поїзди різних категорій.

Момент готовності до відправлення вантажних поїздів з крайніх станцій напрямку, що передається через файли вихідних даних від моделей макрорівнів, може співпадати з відправленням з цієї ж станції пасажирських поїздів, або різниця часу між моментами відправлення пасажирських поїздів до моменту відправлення вантажних поїздів може бути меншою за можливо допустиму засобами СЦБ для забезпечення виконання графіку руху поїздів. В таких випадках вантажні поїзди затримується на станціях на мінімально необхідних час для забезпечення безпеки руху поїздів, в наслідок чого збільшується тривалість простою вагонів на технічних станціях.

В пунктах обороту локомотивів їх узгодження здійснюється на основі пошуку мінімальних простоїв в очікуванні поїздів з урахуванням необхідності виконання ТО-2 та технологій роботи станцій. Цей пошук виконується за допомогою методів лінійного програмування [123].

4.3.3 Інформаційна модель залізничного напрямку

Інформаційна модель на макрорівні призначена для надання інформації про поїзний стан та для відображення показників роботи напрямку. Вона являє собою зображення графіку руху поїздів напрямку на часовій сітці.

Графік руху поїздів зображується у вигляді набору значків S, які відповідають виконаним технологічним операціям з об’єктами. Кожен значок $s \in S$ в пам’яті ЕОМ представляється структурою:

$$s = \{q,\ c,\ E_r,\ t_{\text{н}},\ t_{\text{к}}, h,\ f_{\text{ц}}, \mathbf{Y}_{\text{д}}\}, \tag{4.18}$$

де q – ідентифікатор зображення значка;

$t_н, t_к$ – відповідно час початку та закінчення технологічної операції, яку зображує значок;

h – висота значка;

$f_ц$ – колір значка;

$Y_Д$ – вектор додаткових параметрів.

Розроблені моделі реалізовані в середовищі *C++ Builder* та *Visual Studio* та дозволяють визначити показники роботи графіку руху поїздів, локомотивного та вагонного парку. Методика моделювання роботи залізничного напрямку опублікована в [124].

4.4 Модель технічної станції

4.4.1 Модель технологічного процесу роботи станції

В моделі технологічного процесу (МТП) вхідний потік створюють поїзди, що вимагають обслуговування на станції, при цьому фазами обслуговування виступають окремі технологічні операції. Їх послідовність відповідає технологічному процесу (ТП). Тривалості цих операцій моделюються як випадкові величини, параметри яких залежать від характеристик об'єкту, що досліджується. Обслуговуючими пристроями є виконавці технологічних операцій. Приклади вихідних файлів для опису вхідних поїздопотоків та структури технічної станції наведені в додатку Є.

ТП обробки об’єктів O_j на станції являє собою комплекс технологічних операцій $\boldsymbol{q}_i$, кожна з яких повинна бути виконана у певному порядку перед тим, як об’єкт залишить систему.

В якості об’єктів, що обробляються на станції розглядаються поїзди, локомотиви, маневрові состави та состави, що накопичуються на сортувальних коліях. Приклад опису об’єкту «Пасажирський поїзд» представлений на рис. 4.4.

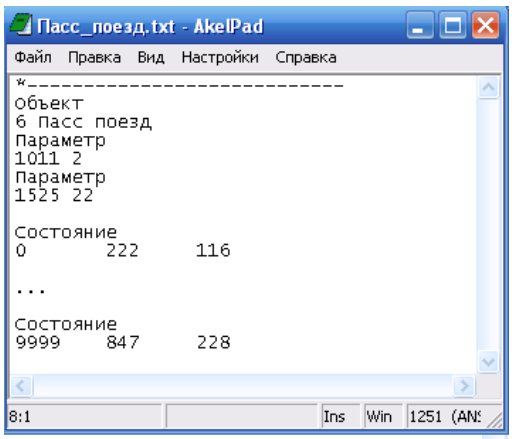
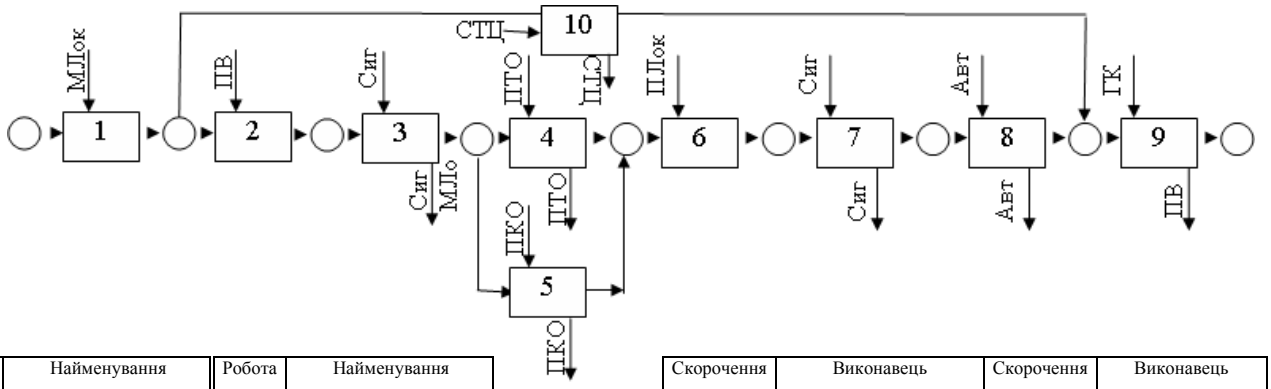


Рис. 4.4 – Об’єкт «Пасажирський поїзд» в моделі

З кожним об’єктом на станції виконуються певні операції, що передбачені технологічним процесом (закріплення, технічний та комерційний огляд составів, випробування автогальм та ін.). В розробленій моделі кожна технологічна операція представляється структурою (4.7). До неї додано ще один параметр s. Він являє собою змінну, що характеризує поточний стан операції q_i для об’єкта O_j. При цьому s=0, якщо операція q_i може бути почата з об’єктом O_j і очікує звільнення виконавця відповідної спеціалізації і s=1, якщо операція q_i виконується, s=2, якщо виконана умова тривалості операції та робота знаходиться в стані виконання умов її закінчення.

Тривалість виконання кожної операції в МТП розглядається як випадкова величина з відповідним законом розподілу (цілочисельний параметр ρ). Значення ρ, а також параметри M[t], σ_t використовується для моделювання випадкової величини t при кожній реалізації обробки состава.

На рис. 4.5 показано приклад формалізації технологічного процесу формування составів на технічній станції. Об’єкт послідовно проходить фази ТП, займаючи та звільнюючи виконавців. В додатку Є наведено приклад файлу вихідних даних МТП сортувальної станції Джанкой.



Робота	Найменування	Робота	Найменування
1	Закінчення формування	6	Причеплення локомотива
2	Перестановка составу	7	Прибирання башмаків
3	Закріплення составу	8	Проба автогальм
4	Технічний огляд	9	Відправлення поїзду
5	Комерційний огляд	10	Обробка документів

Скорочення	Виконавець	Скорочення	Виконавець
МЛок	Маневровий локомотив	ПКО	Бригада ПКО
ПВ	Колія парку відправлення	ПЛок	Поїзний локомотив
Сиг	Сигналіст	Авт	Автоматники
ПТО	Бригада ПТО	ГК	Головна колія
СТЦ	Оператор СТЦ		

Рис. 4.5 – Технологічний процес формування составів

4.4.2 Інформаційна модель роботи станції

Інформаційна модель являє собою зображення добового плану-графіка станції на часовій сітці. Вона призначена для надання ОПР інформації про поточний стан технологічного процесу, а також для сприйняття від ОПР керуючих команд і передачі їх в МТП. В пам'яті ЕОМ добовий графік представляється структурою (4.18).

Для побудови сітки добового плану-графіка готується спеціальний файл даних, зовнішній вигляд якого наведено на рис. 4.6 (див. додаток Є).

Окремі виконавці робіт $E_r \in \mathbf{E}$, r=1, 2 …$n_в$ в моделі відповідають рядкам добового графіка. При цьому кожен виконавець представляється у вигляді структури

$$E_r = \{N_e, \mathbf{D}, c, w, a\}, \tag{4.19}$$

де $N_е$ – назва виконавця;

D – список завдань виконавця;

c – об'єкт, що обробляється виконавцем в поточний момент;

w – ширина рядка, що відповідає виконавцю;

a – покажчик активності виконавця;

$n_в$ – кількість виконавців.

Моделювання роботи станції може виконуватись як автоматично, коли порядок обслуговування встановлюється згідно з заданою системою пріоритетів, так і в інтерактивному режимі, коли цей порядок визначає ОПР. Керування процесом моделювання виконується ОПР за допомогою спеціальних елементів управління: команд меню, кнопок, полів завдань виконавців та лінії межі часу моделювання (рис. 4.7 а-б).

а)

1 1 1 35 Стр #зони

1 1 2 35 Парк #прийома Пд

1 1 3 35 Сортувальний парк С

1 1 4 35 Парк #відправлення О

1 1 5 35 Стр #зони

1 3 0 60 101 - Прийом із …

1 2 1 20 201 - Стрілочна зона …

1 2 0 20 1 - Головна 1…

1 2 2 20 50 - ПТО

1 2 2 20 55 - ПКО

1 2 2 20 70 - Сигналіст

1 2 2 20 11 5 Приймальна №5Пд

…

1 2 2 20 18 12 Приймальна №12Пд

1 2 0 20 26 - Гірка

1 2 0 20 60 - Гірочний локомотив 1

1 2 3 40 341 11 Сортувальна №11

…

1 2 3 40 322 34 Сортувальна №34

1 2 0 40 80 - Локомотив формування 1

1 2 4 20 53 - ПТО

1 2 4 20 57 - ПКО

1 2 4 20 75 - Сигналіст

1 2 4 20 150 - Автоматчик

1 2 4 20 90 35 Відправна №35

…

1 2 4 20 93 38 Відправна №38

1 2 0 60 103 - Відправлення на …

б)

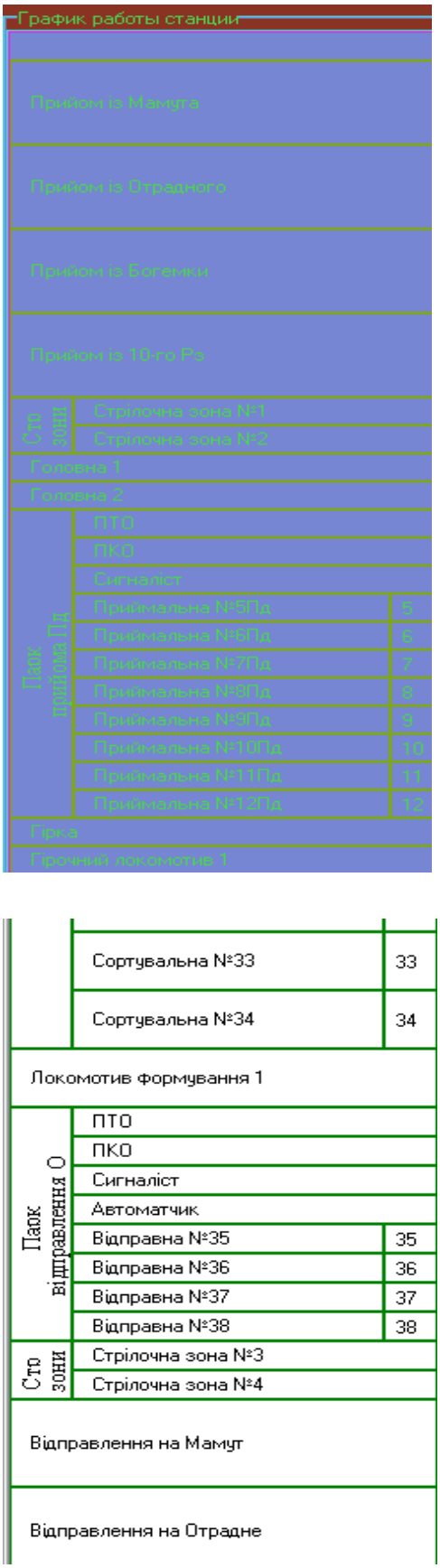


Рис. 4.6 – Формування сітки добового план-графіка
а) код вихідного файлу; б) вигляд сітки в інформаційній моделі

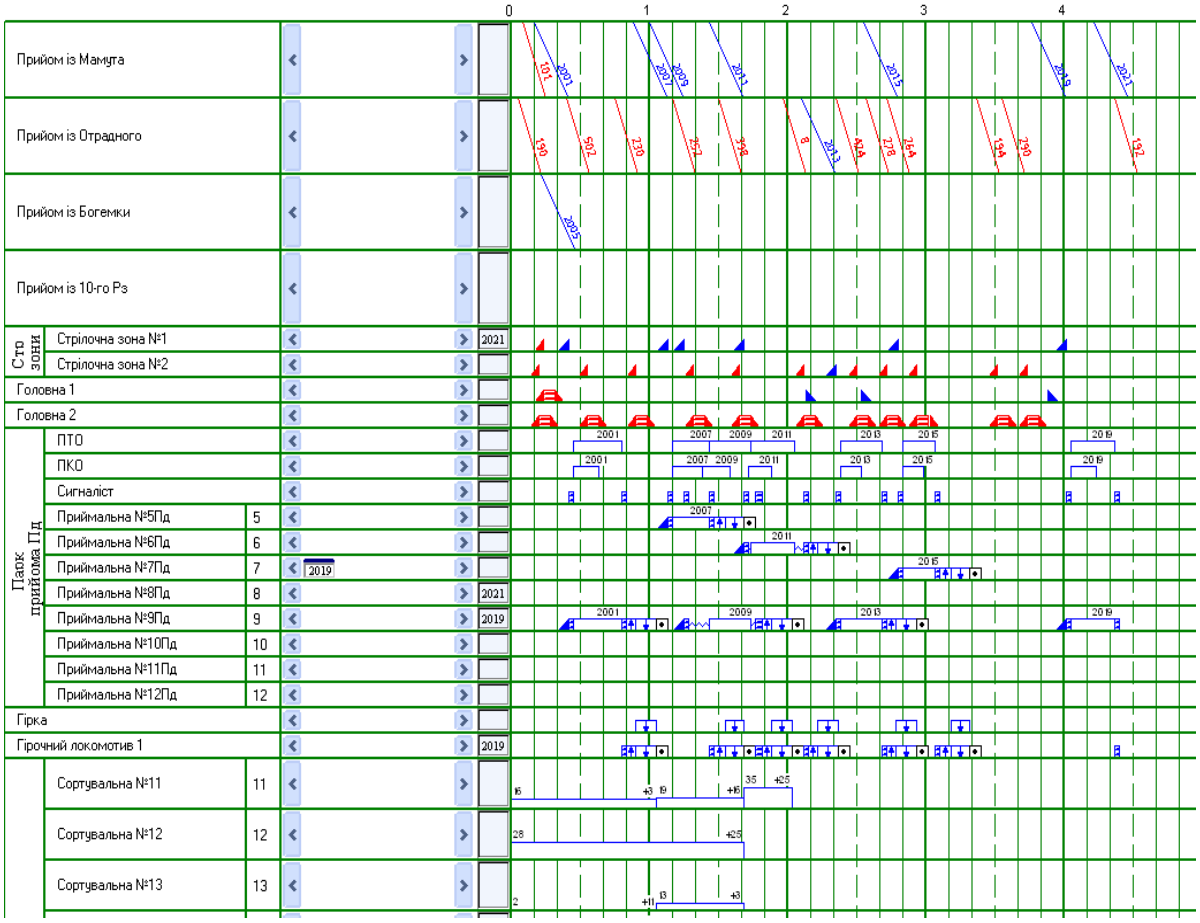


Рис. 4.7 – а) загальний вигляд інформаційної моделі станції

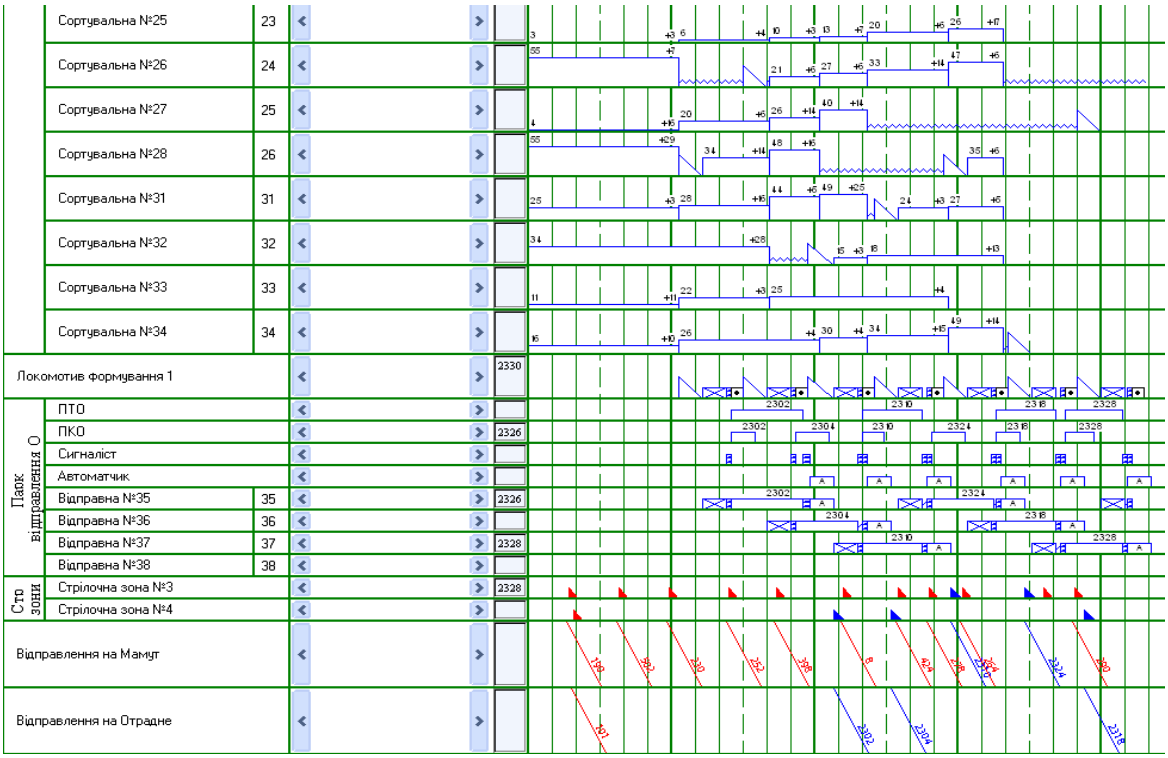


Рис. 4.7 – б) загальний вигляд інформаційної моделі станції:
а) фрагмент підсистеми розформування сортувальної станції;
б) фрагмент підсистеми розформування сортувальної станції

4.5 Перевірка адекватності сполуки моделей мікро- та макрорівнів

Перевірка адекватності розроблених моделей виконана за допомогою критерію Уїлкоксона. *W критерій Уїлкоксона* – це непараметричний аналог парного критерію Стьюдента (*t* - критерій для залежних вибірок). Цей непараметричний критерій оснований на рангах. Принцип його наступний. Дві вибірки параметру, що досліджується, впорядковують за абсолютною величиною. Потім рангам надають знак зміни та сумують ці "знакові ранги" – в результаті отримують значення критерію Уїлкоксона *W*, який порівнюють із максимально допустимим відхиленням. Після цього робиться висновок про відповідність вибірок одна одній. На кафедрі «Станції та вузли» розроблено програмне забезпечення для автоматичного розрахунку (рис 4.8).

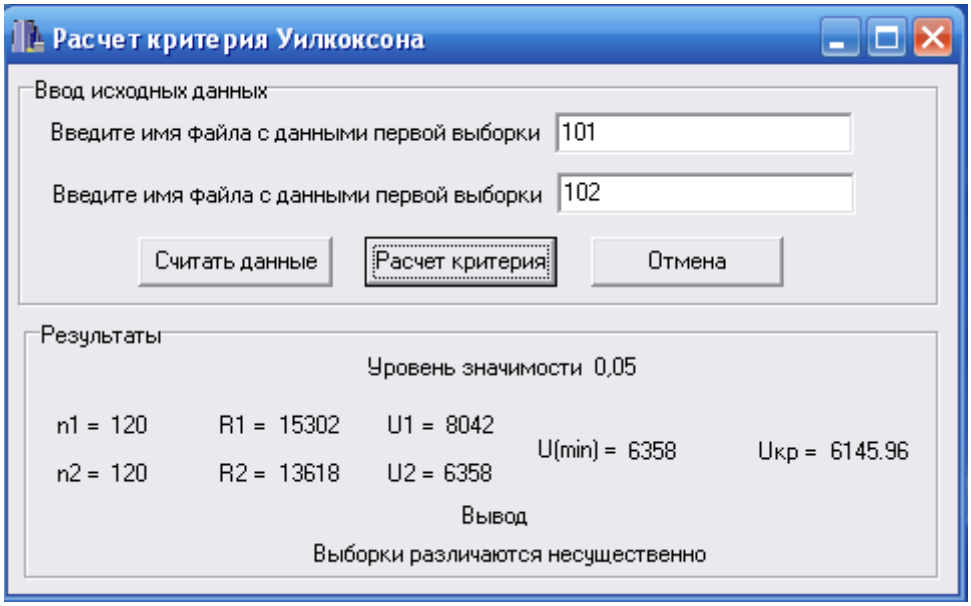


Рис 4.8 – Розрахунок критерію Уїлкоксона

Для сполуки моделей макро- і макрорівнів було проведено перевірку адекватності моделей за показниками роботи залізничного напрямку: дільничної та технічної швидкостей, продуктивності роботи локомотивів, середньодобового пробігу локомотивів. На рис 4.9 показано діаграми розподілу випадкової величини дільничної швидкості на Кримському напрямку залізничних перевезень.

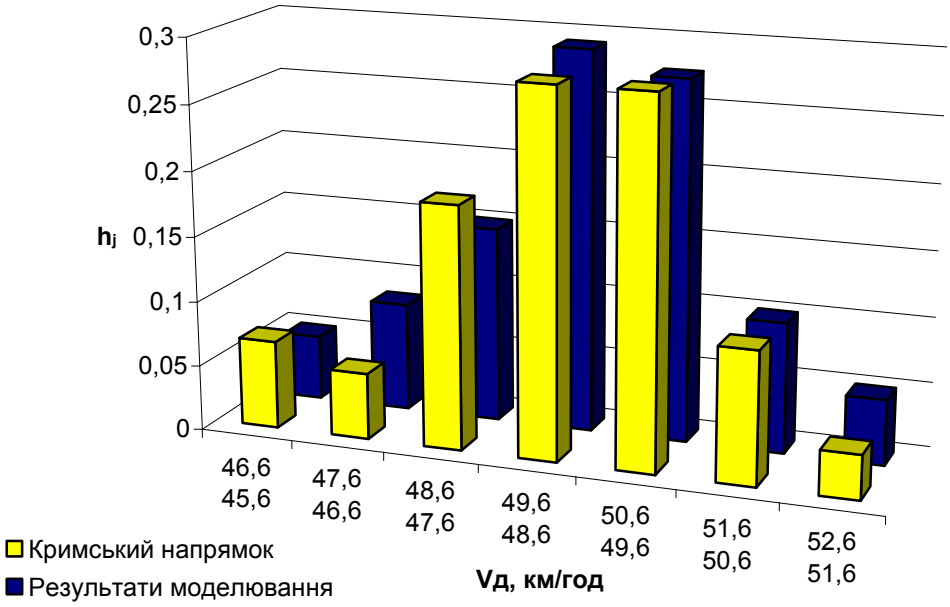


Рис 4.9 – Діаграми розподілу випадкових величин дільничної швидкості на залізничному напрямку та за результатами моделювання

Доведено, що вибірки за показниками роботи залізниці та побудованих моделей відносяться до однієї генеральної сукупності, що вказує на адекватність побудованої моделі залізничного напрямку.

4.6 Висновки

Для дослідження процесів пропуску поїздопотоків на залізничних напрямках побудовано систему імітаційних моделей: на мікрорівні – модель роботи технічних станцій; на макрорівні – модель роботи залізничного напрямку та на метарівні – модель переміщення вантажопотоків в цілому. Розроблені моделі, на відміну від існуючих, надають можливість системно проаналізувати організацію руху поїздів на залізничних напрямках з урахуванням особливостей роботи як роздільних пунктів, так і залізничних ліній. Існує можливість брати участь оперативно-диспетчерському персоналу у процесі прийняття рішень або використовувати модель системи управління, побудовану на основі теорії кінцевих автоматів. Адекватність сполуки моделей була підтверджена за допомогою критерію Уїлкоксона. Розроблені моделі дозволяють встановлювати взаємозв’язки між параметрами поїздопотоків та техніко-експлуатаційними показниками роботи станцій та напрямків.

РОЗДІЛ 5
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПОЇЗДІВ НА ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТАНЦІЙ ТА НАПРЯМКІВ

В сучасних ринкових умовах важливим чинником підвищення якості і ефективності перевезень є науковий пошук вирішення проблеми надійного і економічного функціонування системи управління перевізним процесом і впровадження цих рішень на мережі залізниць. В цьому розділі була поставлена задача визначення впливу параметрів поїздопотоків, що рухаються по залізничних напрямках, на показники їх роботи та технічних станцій з метою знаходження раціональних параметрів поїздів для мінімізації експлуатаційних витрат залізниць та витрат клієнтів.

В роботах [125–126] висувалася ідея впровадження жорсткого графіку руху вантажних поїздів для вирішення поставленої задачі, однак в умовах сьогодення практичної реалізації ця ідея не отримала. Хоча в економічно розвинутих країнах, таких як США, Німеччина, Франція, Японія тощо, поставлена проблема вирішується саме вищезазначеним чином.

Дослідження впливу параметрів поїздопотоків та одиниць потоку поїздів на показники роботи залізничних станцій та напрямків виконано з використанням імітаційних моделей технічних станцій та залізничного напрямку, методика побудови яких викладена в [124] та в розділі 4. Об’єктом дослідження були процеси перевезення на двоколійних електрифікованих залізничних напрямках, що складаються з 31 та 19 перегонів загальною довжиною 241 та 265 км відповідно, а також дві сортувальні та одна дільнична станції, що знаходяться в межах цих напрямків. Залізничні напрямки є сумісними для руху і пасажирських і вантажних поїздів, однак відрізняються структурою та обсягами поїздопотоків – перший з них є більш вантажонапруженим, другий – більш пасажиронапруженим. Аналіз існуючих обсягів роботи, закони розподілу кількості поїздів різних категорій, інтервалів між ними, маси та довжини поїздів представлені в [98, 100] та розділі 2.

5.1 Дослідження роботи технічних станцій

З метою аналізу впливу параметрів вагонопотоків на показники роботи

технічних станцій було детально досліджено роботу станцій Нижньодніпровськ-Вузол та Джанкой.

5.1.1 Методика дослідження показників станцій

При неорганізованому підході вагонопотоків до станції процес знаходження вагонів на станції є безперервним, при чому частина вагонів, яка не відправилась з поїздом, складає залишок на наступну добу. На рис. 5.1 приведено фрагмент графічного зображення процесу простою вагонів на сортувальній станції. Вхідний потік визначається сукупністю моментів надходження поїздів на станцію, розміри та характеристики (в т.ч. кількість вагонів в составі поїздів, які надходять в розформування) якого задаються на початку розв'язання поставленої задачі. В результаті моделювання у файлі протоколу зберігаються дані про моменти відправлення поїздів зі станції та кількість вагонів у кожному поїзді, що дозволяє розрахувати тривалість знаходження транзитного вагону з переробкою в цілому по станції.

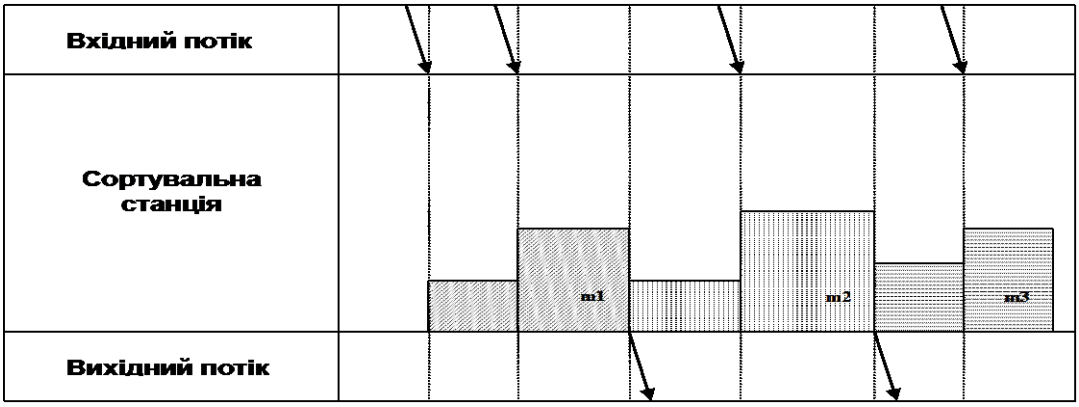


Рис. 5.1 – Графічне зображення процесу простою вагонів на станції

Середня тривалість знаходження транзитного вагону з переробкою на станції розраховується за наступною формулою:

$$t_{пр} = \frac{\sum nt}{\sum n}, \tag{5.1}$$

де $\sum nt$ – вагоно-години простою, ваг-год;

$\sum n$ – добовий вагонопотік, ваг.

Результати моделювання роботи технічної станції зберігаються в окремому файлі протоколу (див. додаток І). Вони представляють собою сукупність моментів подій, які відбулися із окремими поїздами на станції, із відповідним

кодом, наприклад:

1 – момент прибуття поїзда;

2 – момент закінчення розформування поїзда;

3 – момент перестановки состава із сортувального парку у парк відправлення;

4 – момент відправлення поїзда.

Обробка протоколу виконується сортуванням моментів подій по категоріям. Наприклад, для визначення середнього часу простою транзитного вагону з переробкою на стації в цілому відбираються із списку коди 1 та 4, сортуються за часом, а далі виконується розрахунок загальних вагоно-хвилин простою (табл. 5.1). Оскільки зміна стану системи відбувається з моментом зміни кількості вагонів на станції m_j, тобто з прибуттям або відправленням поїздів, то виключно в такі моменти визначається поточна кількість вагонів n_j, що перебувають на станції, та вагоно-години їх простою за даний період часу nt_j, що чисельно дорівнює площі кожного прямокутника. Ці величини розраховуються за формулами:

$$n_j = n_{j-1} \pm m_j \text{ або } n_j = n_{j-1} + M_j \cdot m_j, \tag{5.2}$$

$$nt_j = n_j \cdot (T_{j+1} - T_j), \tag{5.3}$$

де $M_j = 1$ мітка при прибутті вагонів на станцію;

$M_j = -1$ мітка при відправленні вагонів зі станції;

T_{j+1}, T_j – суміжні моменти часу, коли змінюється кількість вагонів в системі «технічна станція».

В зв’язку з тим, що вхідний потік до системи має випадковий характер та тривалість обслуговування є випадковою величиною, стан системи змінюється випадковим чином, а це означає, що в системі відбувається випадковий процес.

В середовищі *Visual Basic* для *Microsoft Excel* був реалізований алгоритм для автоматизованого розрахунку показників роботи технічних станцій та їх підсистем, блок-схема якого наведена в додатку І.

Таблиця 5.1 – Розрахунок показників роботи станції

Початковий стан		m = 40	Кількість вагонів на початок доби: A = 320ваг	
Момент здійснення події	Мітка (+/-)	Поточна кількість вагонів в системі m, ваг	t, хв.	nt, ваг-хв
33,1	1	320	33,1	10592
41,1	1	360	8	2880
54,1	1	400	13	5200
110,1	1	440	56	24640
112,15	1	480	2,05	984
115,2	1	520	3,05	1586
131,15	1	560	15,95	8932
142,55	-1	600	11,4	6840
147,6	-1	560	5,05	2828
		520	18,5	9620

5.1.2 Аналітичний аналіз впливу довжини поїздів на їх простій на технічних станціях

В існуючих методиках розрахунку оптимальної маси поїздів у витратах, що пов’язані з роботою станцій, враховуються лише витрати на накопичення составів поїздів. В той же час, кількість вагонів у складі поїздів впливає на тривалість технологічних операцій, що виконуються з ними. Також слід відзначити, що в тривалості технологічних операцій є складова, яка пов’язана з об’єктом, що оброблюється в цілому. Нижче наведено існуючу методику розрахунків тривалості елементів технологічних процесів, що відбуваються у різних підсистемах технічних станцій.

Тривалість прийому поїзда в парк визначається за формулою:

$$t_{пр} = t_м + \frac{l''_{бл}}{16,7 \cdot V} + \frac{l'_{бл} + L_{вх}}{16,7 \cdot V_{вх}}, \qquad (5.3)$$

де $t_м$ – час готування маршруту та відкриття сигналу;

$l'_{бл}, l''_{бл}$ – довжини блок ділянок;

$L_{вх}$ – відстань від вхідного сигналу до сигналу, що обмежує корисну довжину колії;

V – швидкість руху поїзда по блок-ділянці;

$V_{вх}$ – середня швидкість входу поїзда в парк із урахуванням зниження

швидкості на стрілках при русі на бокові колії та уповільнення перед зупинкою;

$16,7$ – перевідний коефіцієнт для переведення значення швидкості, вираженої в км/год, до значень у м/хв.

Час на закріплення состава й зняття закріплення в парку прийму визначається за формулою:

$$t_{\text{зак}} = (0,08 + 0,01 \cdot l_{\text{пр}})n, \tag{5.4}$$

де $l_{пр}$ – відстань, яку проходить сигналіст при закріпленні;

n – кількість башмаків, що укладають, розраховується за формулою:

$$n = \frac{m \cdot n_{\text{ос}} \cdot (1,5 \cdot i + 1)}{200}, \tag{5.5}$$

де m – кількість вагонів у складі поїзда;

$n_{ос}$ – кількість осей, приймається $n_{ос}$=4;

i – ухил приймально-відправних колій, ‰.

Середня тривалість технічного огляду состава складає

$$t_{\text{ТО}} = \frac{\tau \cdot m}{x} + a, \tag{5.6}$$

де τ - час огляду одного состава;

x - кількість груп оглядачів в одній бригаді;

a – час на початково-кінцеві операції;

Завантаження бригади технічного огляду розраховується за формулою:

$$\psi_{\text{БР}} = \frac{N_{\text{Р}} \cdot t_{\text{ТО}}}{24}, \tag{5.7}$$

де $t_{\text{ТО}}$- середня тривалість технічного огляду,;

Середній час очікування составами поїздів в розформування початку технічного огляду розраховується за формулою:

$$t_{оч}^{ТО} = \frac{\psi_{БР} \cdot \left(\upsilon^2{}_{ВХ} + \upsilon^2{}_{ТО}\right) \cdot t_{ТО}}{2 \cdot \left(1 - \psi_{БР}\right)}, \tag{5.8}$$

де $\upsilon_{ВХ}$ – коефіцієнт варіації інтервалів між моментами прибуття на станцію поїздів у розформування;

$\upsilon_{ТО}$ – коефіцієнт варіації інтервалів при технічному огляді составів.

Тривалість елементів процесу розформування також залежить від довжини

составу. Тривалість заїзду розраховують за формулою:

$$t_з = \frac{0,06(l'_з + l''_з)}{v_з} + t_{ПД}, \quad (5.9)$$

де $t_з$ – час на заїзд локомотива в кінець составу, що відповідає тривалості напіврейсів проходження локомотива від горба гірки у вхідну горловину парку прийому l', зворотнього проходження до кінця составу $l''_з$ із швидкістю $v_з$ та додаткового часу на зміну напряму руху локомотива $t_{ПД}$, хв;

$$t_{нас} = a + bm, \quad (5.10)$$

де m – кількість вагонів в маневровому составі;

a, b – норми часу на напіврейси перестановки, які визначаються відповідно до [87].

$$t_P = \frac{0,06 \cdot l_B \cdot m}{v_P}\left(1 - \frac{1}{2 \cdot g_o}\right), \quad (5.11)$$

де t_P - час на розпуск состава з гірки, хв;

l_B - розрахункова довжина вагона;

V_P - середня швидкість розпуску розрахункового составу, [87];

g_o - кількість відчепів у составі, $g_o = f(m)$;

$$t_{OC} = 0,06 \cdot m_C, \quad (5.12)$$

де t_{OC} – час на осаджування вагонів у сортувальному парку, що доводиться на один розформований состав, хв.

Технологічний час на закінчення формування одногрупних поїздів при накопиченні вагонів на одній колії

$$T_{ОФ}^{ОД} = T_{ПТЕ} + T_{ПІД} \quad (5.13)$$

де $T_{ПТЕ}$ – технологічний час на виконання операцій, пов'язаних з розставлянням вагонів по ПТЕ, хв;

$$T_{ПТЕ} = B + E \cdot m_Ф, \quad (5.14)$$

$T_{ПІД}$ – час на підтягування вагонів з боку витяжної колії для ліквідації «вікон» на сортувальних коліях $T_{ПІД} = 0,08 \cdot m_Ф$, хв;

B, E – нормативні коефіцієнти, величини яких залежать від середньої кількості операцій ρ_O (розчеплення вагонів, що підлягають форматуванню, в місцях неспівпадання подовжніх осей автозчеплення і постановки вагонів прик-

риття) [87];

$m_{Ф}$ – середня кількість вагонів, які входять до состава, що формується.

Технологічний час на закінчення формування групового поїзда, що накопичується на двох коліях

$$T_{ОФ}^{ГР} = T_{ПТЕ}^{ХВ} + T_{ПТЕ}^{ГОЛ} + T_{ПІДТ}, \quad (5.15)$$

де $T_{ПТЕ}^{ГОЛ}, T_{ПТЕ}^{ХВ}$ – тривалість виконання операцій для розстановки вагонів по ПТЕ відповідно хвостовій і головній частин составу, хв.;

$T_{ПІДТ}$ – необхідний час для підтягування вагонів з боку витяжних колій сортувального парку, хв;

$$T_{ПТЕ}^{ГОЛ} = B + E \cdot m_{ГОЛ}, \quad (5.16)$$

$m_{ГОЛ}$ – середня кількість вагонів в головній частині;

$$T_{ПТЕ}^{ХВ} = Ж + И \cdot m_{ХВ}, \quad (5.17)$$

де Ж, И – нормативні коефіцієнти, значення яких залежать від кількості операцій по розчепленню вагонів [87];

Технологічний час на закінчення формування состава збірного поїзда з вагонів, накопичених на одній колії, при виконанні роботи тепловозом і сортуванні вагонів поштовхами

$$T_{ОФ}^{СБ} = T_{С} + T_{СБ}, \quad (5.18)$$

де $T_{С}$ – час на сортування состава, хв;

$T_{СБ}$ – час на збирання підібраних груп вагонів, хв;

Тривалість сортування накопиченого состава

$$T_{С} = A \cdot g_{Ф} + Б \cdot m_{Ф}^{СБ}, \quad (5.19)$$

де $m_{Ф}^{СБ}$ - кількість вагонів в составі поїзда, що формується;

$g_{Ф}$ - кількість відчепів при сортуванні накопиченого на одній сортувальної колії состава групового поїзда;

А, Б - нормативні коефіцієнти, що залежать від способів сортування, типу локомотива, ухилу витяжних колій і стрілочної зони [87].

Технологічний час на збирання вагонів

$$T_{СБ} = 1{,}8 \cdot P + 0{,}3 \cdot n_{сб} \quad (5.20)$$

де P – кількість колій, з яких переставляються вагони;

$n_{сб}$ – кількість вагонів, що переставляються на колію збирання состава;

Технологічний час на перестановку состава в парк відправлення

$$T_{пер} = t_{пер} + t_{В}, \tag{5.21}$$

де $t_{пер}$ – час на перестановку состава з сортувального парку в парк відправлення, хв;

$t_{В}$ – час на повернення локомотива з парку відправлення в сортувальний парк, хв;

Час виконання технічного огляду і безвідчіпного ремонту в парку відправлення визначається за формулою:

$$t_{обр} = \frac{\tau m}{x} + \alpha t_{рем} + d \tag{5.22}$$

де $t_{рем}$ – середня тривалість безвідчіпного ремонту вагонів состава;

α – частка составів (від загальної кількості), що потребують безвідчіпного ремонту вагонів (прийому вагонів або розтягування состава);

d – час підготовчо-заключних операцій.

В наведеній формулі не враховується вплив кількості вагонів у составі на частку составів, що потребують складного безвідчіпного ремонту. Для врахування цього впливу в подальших розрахунках доцільно використовувати значення α, що визначається за формулою:

$$\alpha = \frac{\alpha_{н}}{m_{н}} m, \tag{5.23}$$

де $\alpha_{н}$ – нормативне значення частки составів зі складним безвідчіпним ремонтом, $\alpha_{н}$=0,2 [99];

$m_{н}$ – нормативна довжина состава.

При закріпленні групи сортувальних колій до певної витяжної колії і спеціалізації роботи маневрових локомотивів на кожній з витяжних колій сортувальний парк і витяжні колії формування являють собою декілька одно- канальних СМО. Тоді завантаження кожного з маневрових локомотивів можна визначити за формулою:

$$\psi_{\text{МАН}} = \frac{N_{\text{Р}} \cdot \dfrac{m}{m_{\text{ОТ}}} \cdot t_{\text{ОФ}}}{24 \cdot M_{\text{МАН}}}, \tag{5.24}$$

де $m_{\text{ОТ}}$ - кількість вагонів в поїзді по відправленню;

$t_{\text{ОФ}}$ - середній час обслуговування на витяжних коліях;

$$t_{ОФ} = T_{ОФ} + t_{ПЕР} + t_{В}, \tag{5.25}$$

$$T_{ОФ} = \frac{N^{ОД} \cdot \text{Т}_{ОФ}^{ОД} + \text{N}^{ГР} \cdot \text{Т}_{ОФ}^{ГР} + \text{N}^{СБ} \cdot \text{Т}_{ОФ}^{СБ}}{\text{N}^{ОД} + \text{N}^{ГР} + \text{N}^{СБ}}, \tag{5.26}$$

де $\text{N}^{ОД}, \text{N}^{ГР}, \text{N}^{СБ}$ – відповідно кількість одногрупних, групових, та збірних поїздів, які формуються на витяжних коліях;

$\text{Т}_{ОФ}^{ОД}, \text{Т}_{ОФ}^{ГР}, \text{Т}_{ОФ}^{СБ}$ – відповідно середній час на закінчення формування одногрупних, групових та збірних поїздів;

$t_{ПЕР}$ – час на перестановку составу з сортувального парку у парк відправлення;

$t_{В}$ – час на повернення локомотива з парку відправлення на витяжні колії.

Середній час очікування накопиченими составами початку операцій по закінченню формування розраховується за формулою:

$$t_{\text{ОЖ}}^{\text{ОФ}} = \frac{\psi_{\text{МАН}} \cdot (\upsilon^2 + \upsilon_{\text{ОФ}}{}^2)}{2 \cdot (1 - \psi_{\text{МАН}})} \cdot t_{\text{ОФ}}, \tag{5.27}$$

де $\upsilon_{\text{ОФ}}$ - коефіцієнт варіації тривалості закінчення формування составів;

Завантаження бригад ПТО впливає на середній час очікування составами обробки бригадами ПТО:

$$\psi_{\text{БР}} = \frac{N \cdot t_{\text{ОБР}}}{24 \cdot S}, \tag{5.28}$$

$$t_{\text{ОЖ}}^{\text{ОБР}} = \frac{\psi_{\text{БР}}{}^2 \cdot (\upsilon_{\text{ВХ}}{}^2 + \upsilon_{\text{ОБР}}{}^2)}{2 \cdot (1 - \psi_{\text{БР}}{}^2)} \cdot t_{\text{ОБР}}, \tag{5.29}$$

Тривалість випробування автогальм визначається як

$$t_{\text{авт}} = 3 + 0{,}14m \tag{5.30}$$

Простій вагонів під накопиченням $T_{\text{нак}}$ розраховується за формулою

$$T_{нак} = cm, \tag{5.31}$$

де c – параметр накопичення.

m – кількість вагонів у складі поїздів.

Отже, кількість вагонів у складі поїздів впливає на тривалість технологічних операцій, що виконуються з ними на технічних станціях, а саме на тривалість закріплення рухомого складу та його зняття, тривалість технічного та комерційного огляду поїзда, насуву та розформування состава на сортувальній гірці, осаджування вагонів після розпуску, формування поїздів, випробування автогальм, тощо. В тривалості технологічних операцій є складова, яка пов'язана з об'єктом, що оброблюється в цілому. До таких операцій можна віднести приготування маршрутів, видачу необхідних розпоряджень, заїзд локомотива під состав, інші. Виконаний аналіз показує, що тривалість виконання технологічних операцій по обробці поїздів можна визначити за формулою:

$$t = z + f(m), \tag{5.32}$$

де z – тривалість операцій, що відносяться на поїзд в цілому,

$f(m)$ – тривалість операцій, що відносяться на кількість вагонів у составі.

5.1.3 Аналіз результатів моделювання з використанням ергатичної моделі підсистеми розформування технічної станції

Зміна параметрів поїздопотоків впливає на завантаження окремих елементів системи «станція». З метою оцінки впливу довжини поїздів на роботу станцій було проведено дослідження з використанням ергатичної моделі підсистеми розформування сортувальної станції.

Висунута гіпотеза, що завантаження виконавців при зміні параметрів поїздопотоків, а саме чергових по станції (ДСП), значно вплине на показники роботи станцій. Адже із зміною кількості вагонів у составі поїздів при постійному вагонопотоці змінюється кількість поїздів, а це в свою чергу повинно значно вплинути на завантаженість ДСП.

У [127] рекомендовано, щоб завантаження роботою ДСП задовольняло умові:

$$T_з = (N_{пр} + N_{від})(t_{пригот} + t_{пер}) + nKt_{ман}\, t_м\, m < 580 - 600, \tag{5.33}$$

де $N_{пр}$ – кількість пасажирських та вантажних поїздів, що прибуває на станцію з усіх підходів за зміну;

$N_{від}$ – загальна кількість поїздів, що відправляється зі станції за зміну;

$t_{пригот}$ – витрати часу на приготування одного маршруту, включає вибір колії прийому, приготування маршруту, огляд на табло правильності приготування маршруту;

$t_{ман}$ – витрати часу на приготування одного маневрового маршруту з урахуванням переговорів, пов'язаних з виконанням маневрових операцій (40-55 сек);

n – кількість сформованих та розформованих поїздів;

K – кількість маневрових переміщень, що приходиться на обробку одного поїзда, орієнтовно 12.

m – кількість навантажених та розвантажених вагонів за зміну;

$t_м$ – середній час, що витрачається на обробку одного місцевого вагону (30-40 с) [127].

Результати моделювання по пропуску вагонопотоку через підсистему розформування сортувальної станції в поїздах з кількістю m = 40, m = 50 та m = 60 вагонів представлені в табл. 5.2-5.4.

Таблиця 5.2 – Результати моделювання по пропуску вагонопотоку в поїздах з m = 40 вагонів

Початок операції	Кінець операції	Тривалість операції $t_{оп}$, c							$\overline{t_{оп}}$, c
		Порядковий номер поїзда							
		1	2	3	4	5	6	7	
Відправляється	Відправився	39	49	42	133	42	41	54	57,1
Відправився	Прибув	253	253	259	253	253	256	259	255,1
Прибув	Відчеплено локомотив	106	159	131	92	90	376	348	186,0
Відчеплено локомотив	Огляд составу	545	518	523	534	800	689	656	609,3
Огляд составу	Початок розпуску	447	466	410	817	350	2013	851	764,9
Початок розпуску	Состав розформований	73	77	73	77	92	91	86	81,3
ВСЬОГО									1953,7

Таблиця 5.3 – Результати моделювання по пропуску вагонопотоку в поїздах з m = 50 вагонів

Початок операції	Кінець операції	Тривалість операції $t_{оп}$, с							$\overline{t_{оп}}$, с
		Порядковий номер поїзда							
		1	2	3	4	5	6	7	
Відправляється	Відправився	41	43	41	45	54	40	44	44,0
Відправився	Прибув	253	253	253	253	253	253	278	256,6
Прибув	Відчеплено локомотив	146	145	206	114	217	124	188	162,9
Відчеплено локомотив	Огляд составу	636	744	727	664	914	1129	1138	850,3
Огляд составу	Початок розпуску	279	253	255	333	270	529	274	313,3
Початок розпуску	Состав розформований	73	80	77	77	92	90	90	82,7
ВСЬОГО									1709,7

Таблиця 5.4 – Результати моделювання по пропуску вагонопотоку в поїздах з m = 60 вагонів

Початок операції	Кінець операції	Тривалість операції $t_{оп}$, *с*							$\overline{t_{оп}}$, *с*
		Порядковий номер поїзда							
		1	2	3	4	5	6	7	
Відправляється	Відправився	46	43	40	43	45	45	43	43,6
Відправився	Прибув	253	253	253	253	253	298	256	259,9
Прибув	Відчеплено локомотив	144	165	113	115	302	118	155	158,9
Відчеплено локомотив	Огляд составу	780	1010	757	1294	885	1551	1066	1049,0
Огляд составу	Початок розпуску	418	792	623	515	544	416	535	549,0
Початок розпуску	Состав розформований	73	80	73	90	84	73	85	79,7
ВСЬОГО									2140,0

Середня тривалість знаходження состава в парку прийому розрахована як сума середніх тривалостей виконання технологічних операцій. Наприклад, при кількості m = 40 вагонів це значення складає 1953,7 *с* або 32,6 *хв*.

Результати моделювання представлені на рис. 5.2. На відміну від аналітичних розрахунків, вплив завантаженості виконавців призводить до нелінійності функції $t = f(m)$.

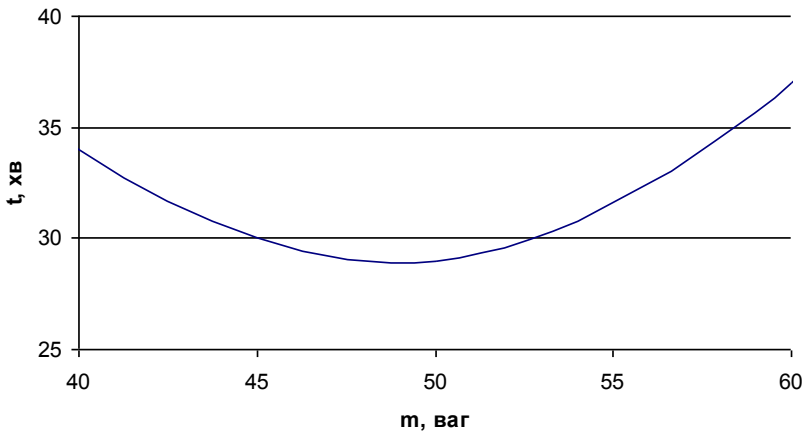


Рис. 5.2. – Залежність тривалості знаходження вагонів в підсистемі розформування від кількості вагонів у составі

5.1.4 Аналіз результатів моделювання, отриманих при використанні МСУ

В дослідженнях була поставлена задача дослідження впливу довжини поїздів на показники роботи станції в умовах зміни технології та параметрів вхідних та вихідних потоків поїздів.

Результати дослідження впливу кількості вагонів у складі поїздів, що надійшли в розформування та свого формування, на тривалість знаходження транзитного вагону з переробкою при постійному вхідному та вихідному потоці та незмінному вагонопотоці зображені на рис 5.3. Поїзди, що надходять у розформування та свого формування, при моделюванні складалися з постійної величини кількості вагонів: m = 40 вагонів для першої групи дослідів, m = 50 та m = 60 вагонів для другої та третьої відповідно. Моделювання виконувалось при постійному вагонопотоці M = 3300 вагонів/добу.

Така параболообразна форма залежності доводить, що існує обмеження знизу по величині кількості вагонів, що призведе до різкого збільшення кількості колій в приймальних парках та безпосередньо поступового збільшення обороту вагону через перевантаження виконавців та обслуговуючих пристроїв.

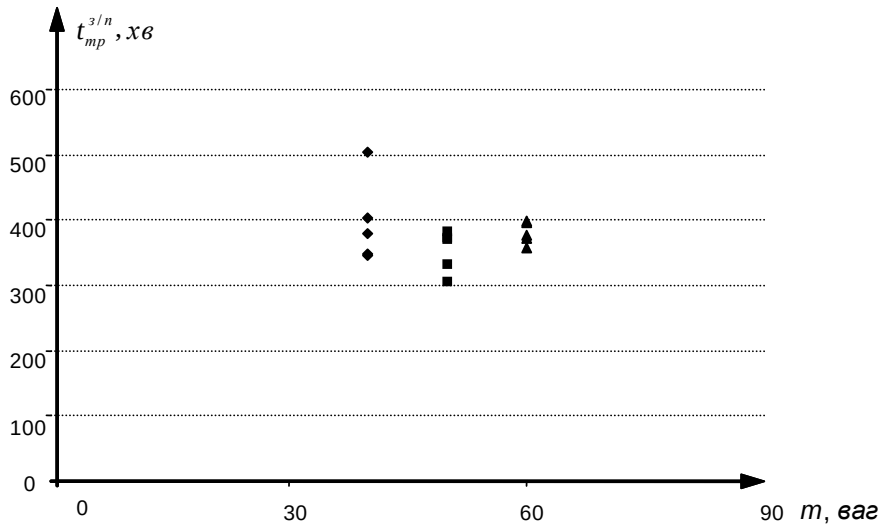


Рис. 5.3 – Множина значень функції $t_{тр}^{з/п}$ при постійному вагонопотоці та постійному вхідному та вихідному потоці

Аналогічне дослідження проводилось при зменшенні та збільшенні добового вагонопотоку з метою визначення впливу обсягів роботи на величину $\bar{t}_{тр}^{з/п}$. Результати моделювання представлені на рис. 5.4.

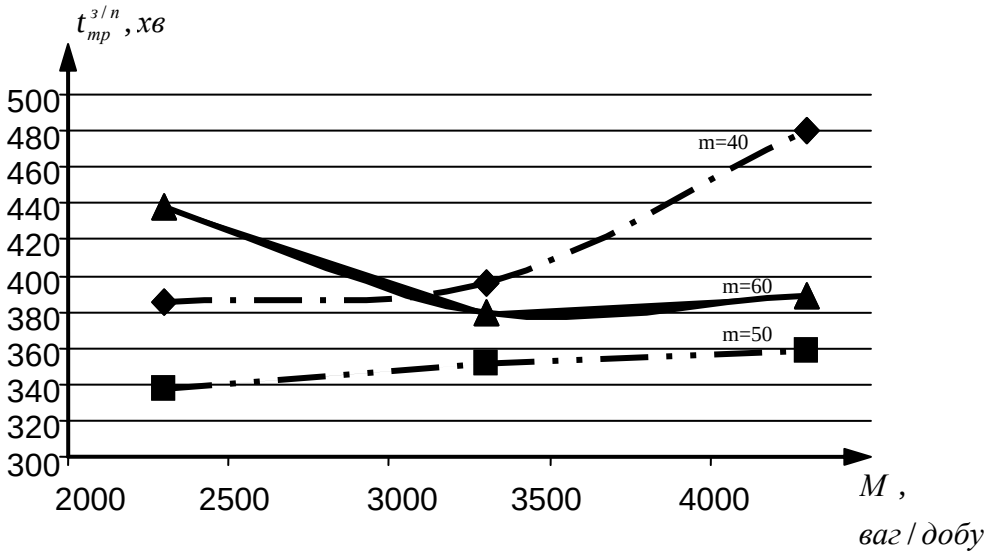


Рис. 5.4 – Вплив вагонопотоку на простій транзитного вагона з переробкою на станції

Таким чином, має місце лінійне збільшення простою при формуванні та розформуванні поїздів з кількістю вагонів m = 50 ваг/состав; експоненційні залежності при збільшенні величини кількості вагонів (m = 60 ваг/состав та m = 40 ваг/состав).

Оскільки існуючі процеси формування вантажних поїздів передбачають

накопичення составів за масою або довжиною, то в моделях була реалізована можливість формування составів вантажних поїздів з кількістю вагонів у діапазоні $m \in [m_{\min}; m_{\max}]$, де $m_{\min}$ – норма по накопиченню, $m_{\max}$ – максимальна кількість вагонів у поїзді. Дослідження проводилось за наступних умов:

1) при постійному вхідному вагонопотоці та змінному вихідному потоці з $m \in [m_{\min}; m_{\max}]$;

2) при змінному вхідному та вихідному потоках.

При постійному добовому вагонопотоці M = 3300 вагонів/добу для сортувальної станції та змінному діапазоні кількості вагонів у составі поїздів свого формування в кожному з дослідів $m_{вих} \in [40;50]$, $m_{вих} \in [40;60]$ та $m_{вих} \in [50;60]$ отримані наступні результати (рис. 5.5). Кожна точка на рисунку відповідає проведенню одного досліду на протязі розрахункового періоду 3 доби. Зазначимо, що в діапазоні $m_{вих} \in [50;60]$ простій вагонів на станціях є мінімальним.

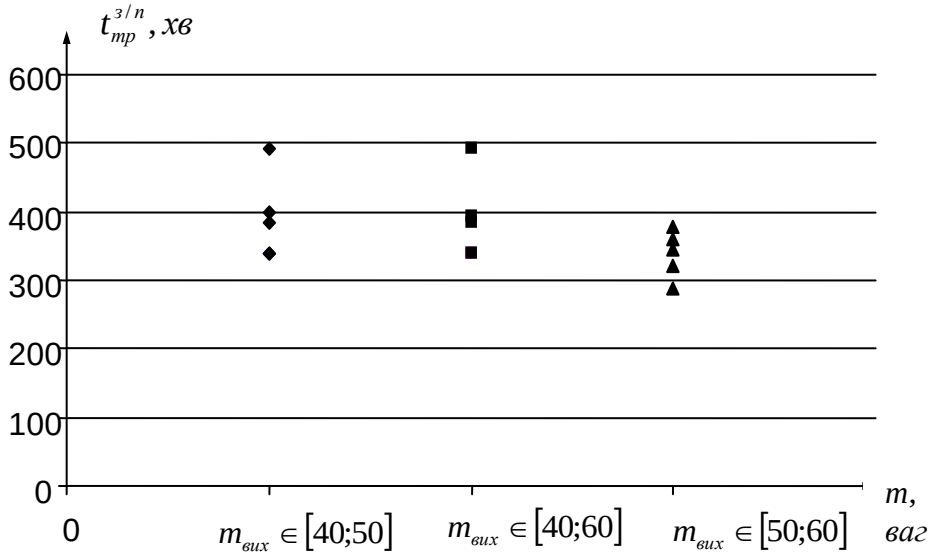


Рис. 5.5 – Множина значень функції $t_{тр}^{з/п}$ при постійному вагонопотоці та змінним діапазоном кількості вагонів у поїздах свого формування

При моделюванні роботи сортувальної станції в умовах, коли як вхідний так і вихідний потік поїздів формується з составів, що складаються з множини в діапазоні $m \in [m_{\min}; m_{\max}]$ тривалість знаходження транзитного вагону на сортувальній станції має незначне відхилення від математичного очікування простою

транзитного вагона $M(\bar{t}_{тр}^{з/п})$, яке визначено на попередньому етапі дослідження (391 проти 387 хв). Це підтверджує припущення про те, що в подальших експериментах вхідний потік можна приймати з постійною кількістю вагонів у составі.

При моделюванні в умовах змінного вихідного потоку та постійного вагонопотоку в кожному досліді було отримано сукупність значень кількості вагонів *m* у складі поїзда. Величина *m* являє собою випадкову величину дискретного типу. В додатку З наведені її статистичні характеристики.

Гістограма розподілу випадкової величини $m_i^* = m_i - 40$, що зміщує величину m_i до початку координат в проміжок [0;10], зображена на рис. 5.6.

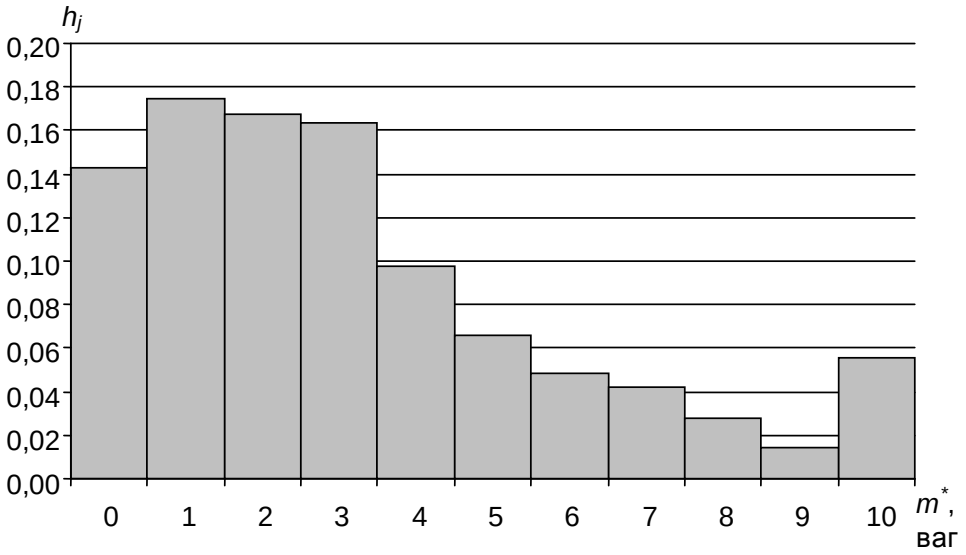


Рис. 5.6 – Гістограма розподілу випадкової величини m_i^*

Була підтверджена гіпотеза про закон розподілу Ерланга з параметром $K = 2$ випадкової величини m_i^*. Враховуючи дискретний характер випадкової величини *m* передбачалось, що нецілі значення випадкової величини будуть округлені до цілих. Кількісна оцінка розходження теоретичного і статистичного розподілів визначена за допомогою критерію згоди Пірсона χ^2: при загальній кількості спостережень $n = 287$ $\chi^2 = 11{,}6$. При ймовірності того, що відхилення теоретичного і статистичного розподілів є чисто випадковими $P = 0{,}1$ та кількості ступенів вільності $r = 7$, критичне значення $\chi^2_{табл} = 12{,}02$. Таким чином, розрахункове значення χ^2 менше від $\chi^2_{табл}$ (11,6<12,02) і гіпотеза про розподіл випадкової величини не суперечить дослідним даним.

5.1.5 Дослідження впливу кількості вагонів у составі поїздів на простій поїздів на технічних станціях на пасажиронапруженому напрямку

Необхідно зазначити, що при дослідженні впливу кількості вагонів у складі поїздів, що надійшли в розформування та свого формування, на тривалість знаходження транзитного вагону з переробкою при незмінному вагонопотоці, вагомим фактором є завантаження ділянок, що примикають до станції. Тому в роботі детально досліджено процес переробки вагонопотоків на сортувальній станції Джанкой, умови функціонування якої значно відрізняються в залежності від періоду року.

Проведене дослідження впливу кількості вагонів *m* у складі поїздів різних категорій (в розформування, свого формування, транзитних) на тривалість знаходження транзитного вагону $t_{тр}$ на станціях при постійному вагонопотоці. На рис. 5.7 наведені результати при літньому (верхня крива) та не літньому (нижня крива) графіках руху пасажирських поїздів.

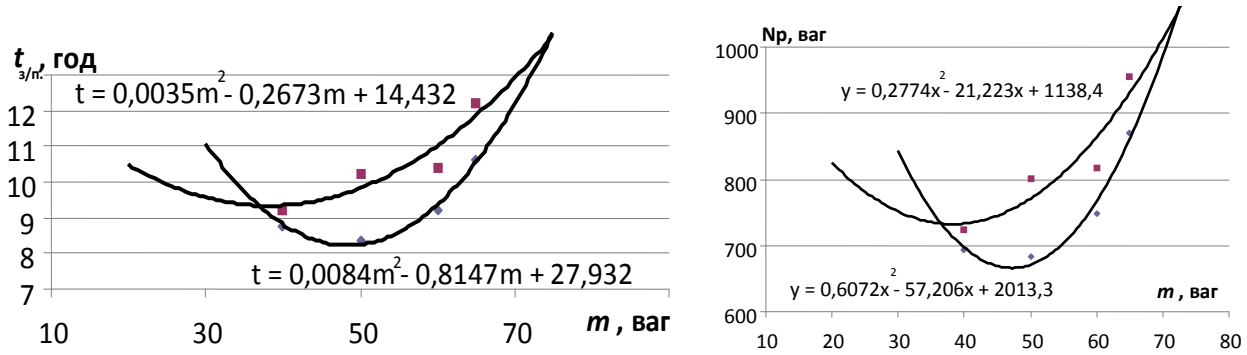


Рис. 5.7 – Залежності простою транзитних вагонів з переробкою на сортувальних станціях та робочого парку вагонів від кількості вагонів у составі поїздів

В результаті була отримана множина значень функції $t_{тр}(m)$, аналіз якої показав збільшення дисперсії показника $t_{тр}^{з/п}$ із зменшенням кількості вагонів у поїзді при нелінійній формі залежності математичного очікування $M\left[t_{тр}^{з/п}\right]$ як функції від *m*. Це доводить, що існує обмеження знизу по величині *m*, яке призведе до різкого збільшення необхідної кількості колій в парках станцій та безпосередньо поступового збільшення обороту вагону по причині перевантаження виконавців та обслуговуючих пристроїв.

На рис. 5.8 (а,б) показані залежності простоїв в окремих парках станції від кількості вагонів у составах поїздів та в цілому по станції (рис. 5.8, в). Форма залежностей також має параболоподібну форму.

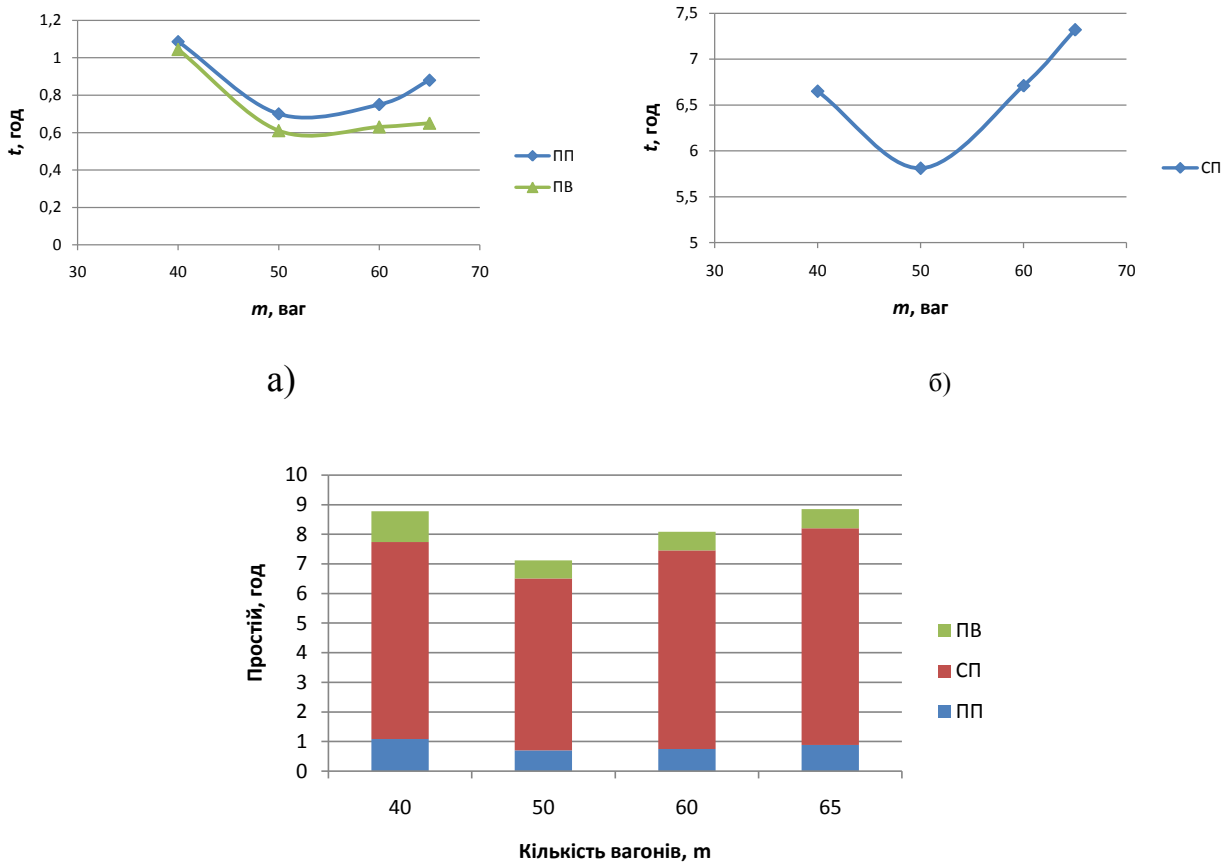


Рис. 5.8 – Залежність простою транзитних вагонів в парках сортувальних станцій від кількості вагонів у їх составі:
а) в парках прийому та відправлення; б) в сортувальному парку;
в) в цілому на станції

Отже, для сортувальних станцій, що працюють в різних режимах завантаження прилеглих ділянок пасажирськими поїздами на протязі року можна використовувати різну технологію в залежності від мети управління вагонопотоками. У випадку необхідності прискорення пропуску вагонопотоків необхідно формувати поїзди довжиною близько 50 вагонів у составі при не літньому графіку руху поїздів та близько 40 вагонів при літньому графіку за наявності необхідної кількості локомотивів та локомотивних бригад. Якщо метою управління вагонопотоками на напрямку є зменшення експлуатаційних витрат, то формувати необхідно довгосоставні поїзди максимально можливої довжини. Обмеженням довжини виступатиме корисна довжина приймально-відправних колій

станцій напрямків формування поїздів та тягові властивості локомотивів поїздів.

5.1.6 Аналіз впливу кількості вагонів у составі поїзда на експлуатаційні витрати станції

У системі одиничних норм витрати визначають в залежності від значного числа характерних вимірювачів, що дозволяє з найбільшою точністю враховувати детальні конкретні особливості варіантів. Витрати С, грн пов'язані з експлуатацією рухомого складу на поїзд, состав або локомотив, визначають із застосуванням так званої розгорнутої формули [128, 129], загальної для всіх видів роботи (поїзна, маневрова) та категорій поїздів (вантажні, пасажирські):

$$C = R_л \cdot e_{R_Л} + R_{co} \cdot e_{R_{CO}} + R_T \cdot e_{R_T} + G \cdot e_G' + Ml \cdot e_{MS} \cdot 10^{-3} + t_{мн} \cdot e_{мн} + t_{мh} \cdot e_{мh} + \\ + t_{Nh} \cdot e_{Nh} + m \cdot t_{пн} \cdot e_{пн} \cdot 10^{-3} + ml \cdot e_{ns} \cdot 10^{-3} + (P+Q) \cdot l \cdot e_{pe} \cdot 10^{-6} \quad (5.35)$$

де $R_л$ – механічна робота локомотивів, тис. ткм;

R_{co} – механічна робота сил основного опору, тис. ткм;

R_T – механічна робота сил гальмування, тис. ткм;

G – витрата дизельного палива, т, або електроенергії, тис. кВт-год;

M – число локомотивів на один поїзд;

l – відстань пробігу, км;

$t_{мн}$ – час руху (а також простою) локомотивів, год;

$t_{мh}$ – час роботи локомотивних бригад, год;

t_{Nh} – час роботи бригад складачів, год;

m – число вагонів у составі;

$t_{пн}$ – час руху (а також простою) вагонів, год;

$P+Q$ – маса поїзда брутто, т;

$e_{R_Л}$ – одинична норма витрат, що відносяться на механічну роботу локомотивів, грн./тис.ткм;

$e_{R_{CO}}, e_{R_T}$ – одиничні норми витрат, що відносяться на механічну роботу сил основного опору та сил гальмування, грн./тис.ткм;

e_G' – витрати на 1 т дизельного палива або на 1000 кВт-год.

На підставі отриманих результатів досліджень, розраховані витрати пов'язані з простоєм вагонів та роботою маневрового локомотива для кожного парку окремо.

Для системи розформування витрати $E^i_{роз}$, грн визначені за формулою:

$$E_{роз} = E^i_{ваг} + E^i_{лок}, \tag{5.36}$$

$E^i_{ваг}$ – витрати пов'язані з простоєм вагонів у парку прийому, грн.;

$E^i_{лок}$ – витрати пов'язані з роботою маневрового локомотива, грн.

$$E_{ваг} = B_{ваг} c_{ваг}, \tag{5.37}$$

де $B_{ваг}$ – вагоно-години простою в парку прийому, отримані в результаті моделювання;

$c_{ваг}$ – витратна норма однієї години простою, грн.

$$E_{лок} = L_{роз} c_{лок}, \tag{5.38}$$

де $L_{роз}$ – локомотиво-години маневрової роботи;

$c_{лок}$ – витратна норма роботи локомотива, грн.

Витрати у сортувальному парку визначені за формулою

$$E_{нак} = B_{нак} c_{ваг}, \tag{5.39}$$

де – $B_{нак}$ – вагоно-години простою під накопиченням.

Для парку відправлення витрати визначені за формулою

$$E_{від} = E_{ваг} + E_{лок}, \tag{5.40}$$

$E_{від}$ – сумарні витрати, для формування составу, грн.;

$E_{ваг}$ – витрати пов'язані з простоєм вагонів у парку відправлення, грн.;

$E_{лок}$ – витрати пов'язані з роботою маневрового локомотива у парку відправлення, грн.

Загальні витрати для трьох парків визначені за формулою:

$$E_{заг} = E_{роз} + E_{нак} + E_{від}. \tag{5.41}$$

На рис. 5.9 наведені витрати на простій вагонів по парках та по станції цілому. Результати розрахунків витрат на локомотиво-години маневрової роботи по парках станції приведені на рис 5.10.

грн.

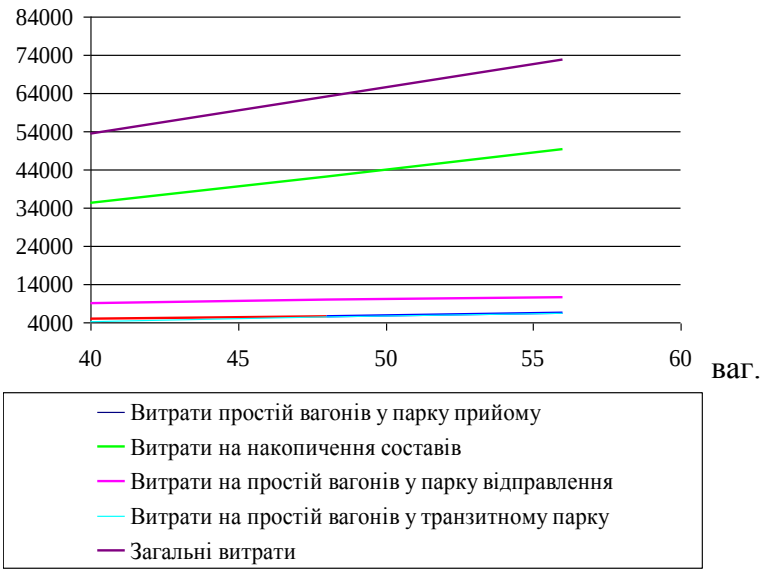


Рис. 5.9 – Витрати на простій вагонів по парках станції

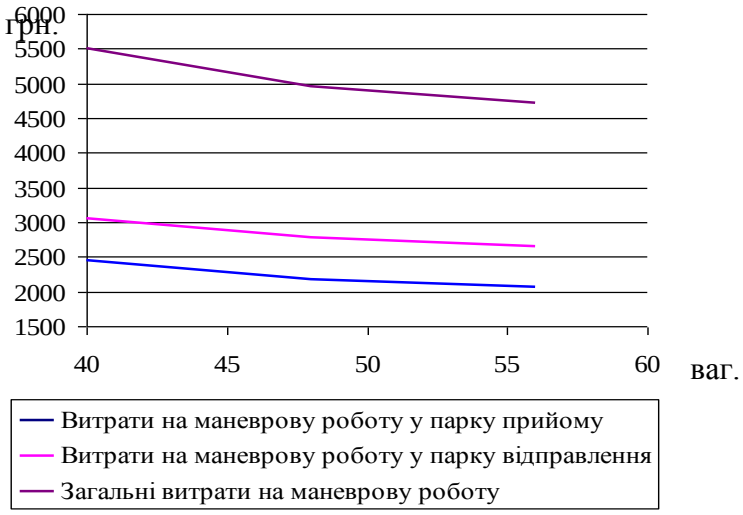


Рис. 5.10 – Витрати на маневрову роботу по парках станції

Залежність загальних витрат по станції, у порівнянні з витратами на накопичення вагонів у сортувальному парку, наведено на рис. 5.11.

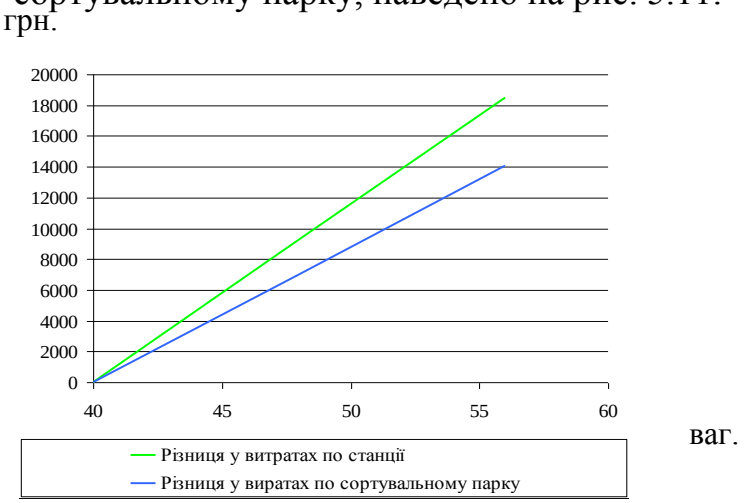


Рис. 5.11 – Залежність загальних витрат по станції від витрат на накопичення составів

Таким чином, виконані техніко-експлуатаційні розрахунки показали, що існуюча спрощена методика оптимізації маси поїздів призводить до заниження експлуатаційних витрат на 10-15% і відповідних похибок в розрахунках.

5.2 Дослідження роботи залізничних напрямків

Для аналізу впливу параметрів поїздів у потоці та обсягу потоку на показники роботи залізниць проведені дослідження з використанням імітаційної моделі залізничного напрямку (розділ 4). В якості вихідних даних розглядались кількість вагонів у складі вантажного поїзда $m \in \{40; 65\}$, кількість пасажирських поїздів відповідала існуючим розмірам руху в літній та нелітній періоди. Вхідний потік поїздів на станцію та параметри поїздів моделювалися за відповідними законами розподілу, зазначених в [100].

5.2.1 Визначення впливу параметрів поїздів на тривалість знаходження на напрямку

Для визначення тривалості знаходження складу на дільниці T в залежності від числа вагонів у складі поїзда m, вагонопотоку A і кількості пасажирських поїздів N висунуто гіпотезу про лінійну модель. З цією метою виконані експерименти на імітаційній моделі за таких умов:

1) Кількість вагонів x_1: основний рівень m_0 = 50 ваг, крок варіювання Δm = 10 ваг;

2) Обсяг вагонопотоків x_2: основний рівень A_0 = 2000 ваг, крок варіювання ΔA = 1000 ваг;

3) Кількість пасажирських поїздів x_3: основний рівень N_0 = 20 поїздів, крок варіювання ΔN=10 поїздів.

5.2.1.1 *Планування експерименту.* Для отримання лінійної моделі $T = f(m, N, A)$ на основі дослідних даних необхідно підготувати план експерименту. Для лінійної моделі, що містить три чинники m, N і A, план повного факторного експерименту включає $N = 2^3 = 8$ дослідів (табл. 5.5).

В таблиці вказані нормовані значення факторів: нижній рівень $x_j = -1$, верхній рівень $x_j = +1$.

Дійсні значення факторів X_j визначають за допомогою формули:

$$X_j = X_{0j} + \Delta X_j \cdot x_j, \qquad (5.42)$$

де X_{0j} – основний рівень фактора X_j;

ΔX_j – крок варіювання фактора X_j.

Таблиця 5.5 – Матриця планування експерименту

Номер досліду	x_1	x_2	x_3	y	A	m	N
1	-1	-1	1	y_1	1000	40	30
2	-1	1	-1	y_2	1000	60	10
3	1	-1	-1	y_3	3000	40	10
4	1	1	1	y_4	3000	60	30
5	-1	-1	-1	y_5	1000	40	10
6	-1	1	1	y_6	1000	60	30
7	1	-1	1	y_7	3000	40	30
8	1	1	-1	y_8	3000	60	10

5.2.1.2 *Перевірка відтворюваності експерименту*. Для перевірки відтворюваності експерименту необхідно визначити оцінки дисперсії S_i^2 в дослідах $i = 1,...,N$ і виконати аналіз їх однорідності. З цією метою значення (t_{i1}, t_{i2},..., t_{i11}) для всіх дослідів записують у табл. 5.6 і знаходять для кожного з них середнє значення часу $\overline{t_i}$ і середнє значення квадрата часу $\overline{t_i^2}$. Далі за цими даними розраховують незміщену оцінку дисперсії S_i^2 для кожного досліду за допомогою формули:

$$s_i^2 = \frac{n}{n-1}(\overline{t_i^2} - (\overline{t_i})^2) \qquad (5.43)$$

Таблиця 5.6 – Визначення дисперсій S_i^2

Точки i	Досліди											$\overline{t_i}$	$\overline{t_i^2}$	S_i^2
	t_{i1}	t_{i2}	t_{i3}	t_{i4}	t_{i5}	t_{i6}	t_{i7}	t_{i8}	t_{i9}	t_{i10}	t_{i11}			
1	401	402	400	400	404	404	399	401	399	402	401	401	160949,5	2,694
2	391	388	388	393	390	392	390	392	390	391	391	391	152528	2,248
3	388	388	388	388	388	388	388	389	388	389	387	388	150614,8	0,264
4	403	404	407	404	403	405	403	407	406	405	406	405	163879,9	2,149
5	389	389	387	388	387	387	386	388	388	388	387	388	150262,7	0,777
6	404	406	403	402	404	403	406	402	403	404	405	404	163070,9	1,785
7	403	402	404	403	401	403	402	404	404	402	404	403	162336,7	0,992
8	390	390	390	390	391	391	390	390	390	390	390	390	152242	0,149
Сума														11,058

Для перевірки гіпотези про однорідність оцінок дисперсій S_i^2 використовуємо критерій Кохрена:

$$G = \frac{\max\limits_{i} S_i^2}{\sum\limits_{i=1}^{N} S_i^2} \qquad (5.44)$$

Необхідно порівняти знайдене значення $G = \frac{2,694}{11,058} = 0,243$ з критичним $G_{кр}$ для числа ступенів свободи $\nu_{1вос}$ = n -1 і $\nu_{2вос}$ = N при рівні значущості $q_{вос}$ = 0,05. Враховуючи, що числа ступенів свободи $\nu_{1вос}$ = 9-1 = 8 і $\nu_{2вос}$ = 8, критичне значення $G_{кр}$ = 0,3. Оскільки отримане значення G =0,243<$Gкр$ = 2,8, то гіпотеза про однорідність вибіркових дисперсій не суперечить спостереженням. При цьому всю групу вибіркових дисперсій S_i^2 можна вважати оцінками однієї і тієї ж генеральної дисперсії σ^2 відтворюваності експерименту. Тоді оцінку дисперсії відтворюваності експерименту визначають як:

$$s_{вос}^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} s_i^2 \qquad (5.45)$$

$$s_{вос}^2 = \frac{1}{8} \cdot 11,058 = 1,382$$

Зазначена оцінка буде використана для перевірки адекватності моделі об'єкту дослідження.

5.2.1.3 *Отримання математичної моделі тривалості руху поїздів на напрямку.*

Функція відгуку при трьох факторах має вигляд

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{123}x_1x_2x_3, \qquad (5.46)$$

або, для умов поставленої задачі

$$t = a_0 + a_1m + a_2A + a_3N + a_{12}mA + a_{13}mN + a_{23}AN + a_{123}mAN \qquad (5.47)$$

У виразі (5.46) дійсні значення змінних перетворені в нормовані відповідно до формули:

$$x_i = \frac{X_i \pm X_{0i}}{\Delta X_i} = \pm 1, \qquad (5.48)$$

Розрахунок коефіцієнтів рівняння представлено в таблиці 5.7.

Використовуючи дані табл. 5.7, визначено коефіцієнти рівняння (5.46):

$$b_0 = \frac{\sum\limits_{i=1}^{N} x_{0i}t_i}{N} = 396,15, \quad b_1 = \frac{\sum\limits_{i=1}^{N} x_{1i}t_i}{N} = 0,35, \quad b_2 = \frac{\sum\limits_{i=1}^{N} x_{2i}t_i}{N} = 1,19,$$

$$b_3 = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_{3i} t_i}{N} = 7,03 \qquad b_{12} = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_{1i} x_{2i} t_i}{N} = -0,19, \quad b_{13} = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_{1i} x_{3i} t_i}{N} = -0,06,$$

$$b_{23} = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_{2i} x_{3i} t_i}{N} = 0,33, \qquad b_{123} = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_{1i} x_{2i} x_{3i} t_i}{N} = 0,01.$$

Таблиця 5.7 – Розрахунок коефіцієнтів рівняння

Дослід	Рівні факторів								t
	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	
1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	401
2	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	391
3	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	388
4	1	1	1	1	1	1	1	1	405
5	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	388
6	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	404
7	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	403
8	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	390
Коефіцієнти рівняння									
	$x_0 t$	$x_1 t$	$x_2 t$	$x_3 t$	$x_1 x_2 t$	$x_1 x_3 t$	$x_2 x_3 t$	$x_1 x_2 x_3 t$	
1	401,2	-401,2	-401,2	401,2	401,2	-401,2	-401,2	401,2	
2	390,5	-390,5	390,5	-390,5	-390,5	-390,5	390,5	390,5	
3	388,1	388,1	-388,1	-388,1	-388,1	388,1	-388,1	388,1	
4	404,8	404,8	404,8	404,8	404,8	404,8	404,8	404,8	
5	387,6	-387,6	-387,6	-387,6	387,6	387,6	387,6	-387,6	
6	403,8	-403,8	403,8	403,8	-403,8	403,8	-403,8	-403,8	
7	402,9	402,9	-402,9	402,9	-402,9	-402,9	402,9	-402,9	
8	390,2	390,2	390,2	-390,2	390,2	-390,2	-390,2	-390,2	
Разом	3169,2	2,8	9,5	56,3	-1,5	-0,5	2,6	0,1	

З урахуванням знайдених коефіцієнтів рівняння функція відгуку буде мати наступний вигляд:

$$t = 396,15+0,35x_1+1,19x_2+7,03x_3-0,19x_1x_2-0,06x_1x_3+0,33x_2x_3-0,01x_1x_2x_3 \quad (5.49)$$

Після визначення оцінок коефіцієнтів b_j моделі, виконана перевірка гіпотези про їх значущість. Для цього знайдено дисперсію оцінки коефіцієнта b_j, яка однакова для всіх коефіцієнтів:

$$S_b^2 = \frac{S_{\text{вос}}^2}{Nn} = \frac{1,382}{8 \cdot 9} = 0,019$$

Довірчий інтервал для коефіцієнта b_j можна знайти за допомогою критерію Стьюдента [130, 131]:

$$\Delta b_j = t_{\nu,q} S_b \tag{5.50}$$

де $t_{\nu,q}$ – табличне значення критерію Стьюдента, що визначається при числі ступенів свободи $\nu_{\text{зн}} = N(n-1)$ і рівні значущості $q_{\text{зн}}$. При $\nu_{\text{зн}} = 8(9-1) = 64$ і рівні значущості $q_{\text{зн}}$ = 0,05 значення $t_{\nu,q} = 1,993$. Тоді довірчий інтервал для коефіцієнтів b_j дорівнює:

$$\Delta b_j = 1,993\sqrt{0,019} = 0,276.$$

В результаті порівняння всі знайдені коефіцієнти з довірчим інтервалом $\Delta b_j = 0,276$, у випадках коли $|b_j| < \Delta b_j$, коефіцієнт відкидають, вважаючи його незначним; інакше коефіцієнт b_j є значимим і його включають у модель.

У результаті обробки даних експерименту отримано коефіцієнти: b_0=396,15; b_1=0,35; b_2=1,19; b_3= 7,03; b_{12}= -0,19; b_{13} = -0,06; b_{23}= 0,33; b_{123}= 0,01. Як видно, перші чотири коефіцієнти є значущими і їх включають у модель. Остаточно отримана модель має вигляд:

$$t = 375,795 + 0,35 \cdot 10^{-3} A + 0,119m + 0,703N. \tag{5.51}$$

5.2.1.4 *Перевірка адекватності моделі***.** Для перевірки адекватності моделі необхідно порівняти значення функції відгуку t_i, отримані за допомогою моделі, з дослідними даними $\overline{t_i}$ у всіх точках експерименту ($i = 1,...,N$). Розсіяння результатів дослідів навколо отриманого рівняння регресії (моделі об'єкта дослідження), можна охарактеризувати за допомогою дисперсії адекватності:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{n}{N-d} \sum_{i=1}^{N} (\overline{t_i} - t_i)^2, \tag{5.52}$$

де d – число членів рівняння регресії (d =2).

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{11}{8-2} \cdot 1,19 = 2,189.$$

Значення дисперсії адекватності визначені в таблиці 5.8.

Перевірку гіпотези про адекватність моделі виконують за допомогою

F-критерію Фішера:

$$F = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{вос}}^2}. \tag{5.53}$$

$$F = \frac{2,189}{1,382} = 1,584.$$

Таблиця 5.8 – Розрахунок дисперсії адекватності $S_{\text{ад}}^2$

Дослід	T	t_i	t-t_i	$(t$-$t_i)^2$
1	401	401,6	-0,5	0,2
2	391	390,0	0,6	0,3
3	388	388,3	-0,2	0,0
4	405	404,7	0,1	0,0
5	388	387,6	0,1	0,0
6	404	404,0	-0,2	0,0
7	403	402,3	0,6	0,3
8	390	390,7	-0,5	0,2
Сума				1,19

Для перевірки гіпотези виконано порівняння табличного значення $F_{\text{кр}}$ критерію Фішера при ступенях свободи $\nu_{\text{ад}} = N - d$ та $\nu_{\text{вос}} = N(n-1)$. Значення $F_{\text{кр}}$ залежить також від прийнятого рівня значущості $q_{\text{ад}}$ (прийнято 0,05). Число ступенів свободи $\nu_{\text{ад}} = N - d$ = 8 – 2 = 6, $\nu_{\text{вос}} = N(n-1)$= 8 (11-1)=80; тоді при рівні значущості $q_{\text{ад}}$=0,05 значення критерію Фішера $F_{\text{кр}}$=2,21. Оскільки обчислене за результатами спостережень емпіричне значення критерію F =1,584 < $F_{\text{кр}}$=2,21, то гіпотеза про адекватність моделі дослідним даним не суперечить.

5.2.2 Розрахунок показників роботи залізничного напрямку

За допомогою моделі технологічного процесу (розділ 3) по результатам моделювання розраховані наступні показники роботи залізничного напрямку.

Середня маса поїзда брутто розраховується за формулою:

$$Q_{\text{сер}} = \sum_{i=1}^{N} Q_i / N, \tag{5.54}$$

де Q_i – маса i-го поїзду,т;

N – загальна кількість вантажних поїздів.

Середня тривалість знаходження поїзда на напрямку розраховується за

формулою:

$$T_{\text{н}} = \frac{\sum_{i=1}^{N}(T_{\text{вих}i} - T_{\text{вх}i})}{N}, \tag{5.55}$$

де $T_{\text{вх}}$ та $T_{\text{вих}}$ – моменти входу та виходу поїздів на напрямок.

Дільнична швидкість є одним з головних якісних показників роботи залізниці. Для її визначення модель розраховує середній час знаходження вантажного поїзда на напрямку $T_{\text{н}}$ на основі визначених раніше моментів відправлення поїздів з першої станції ділянки та моментів їх прибуття на кінцеву станцію та повної довжини ділянки. Дільнична швидкість в моделі розраховується за наступною формулою:

$$V_{\text{д}} = \frac{\sum NL}{60T_{\text{н}}}, \tag{5.56}$$

де $\sum NL$ - сумарні поїздо-години.

Середній простій локомотива в основному депо розраховується за формулою:

$$T_{\text{ос}} = \frac{\sum_{j=1}^{m}\left(T_{\text{від}_j} - T_{\text{пр}_j}\right)}{M_{\text{е}}}. \tag{5.57}$$

Середній простій локомотива в оборотному депо розраховується за формулою:

$$T_{\text{об}} = \frac{\sum_{j=1}^{m}\left(T_{\text{від}_j} - T_{\text{пр}_j}\right)}{M_{\text{е}}}, \tag{5.58}$$

де $T_{\text{від}_j}$ – момент відправлення j-го локомотива із пункту обороту;

$T_{\text{пр}_j}$ – момент прибуття j-го локомотива в пункт обороту;

$M_{\text{е}}$ – кількість локомотивів.

Оборот локомотива розраховується за формулою:

$$O_{\text{л}} = \frac{2L}{V_{\text{д}}} + T_{\text{ос}} + T_{\text{об}} \tag{5.59}$$

Необхідний експлуатаційний парк локомотивів розраховується за формулою:

$$M_{е} = \frac{O_{л} N}{24}. \qquad (5.60)$$

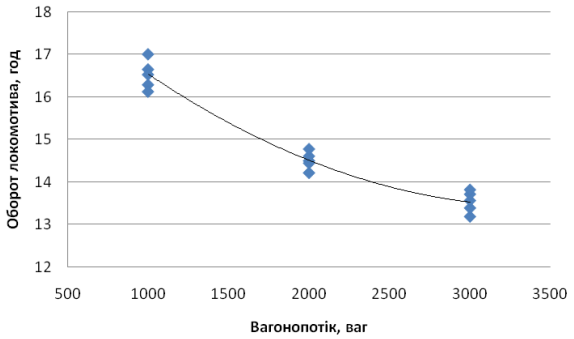
Середньодобовий пробіг локомотива розраховується за формулою:

$$S_{л} = \frac{2LN}{M_{е}} \qquad (5.61)$$

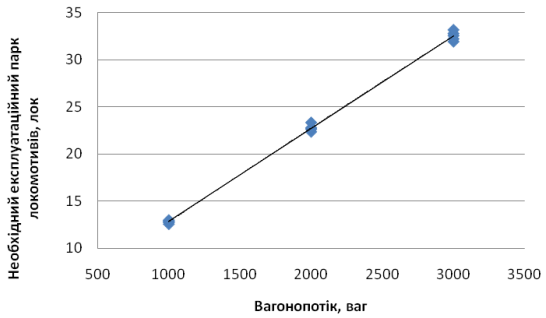
Продуктивність локомотива розраховується за формулою:

$$W_{л} = S_{л} Q_{сер}. \qquad (5.62)$$

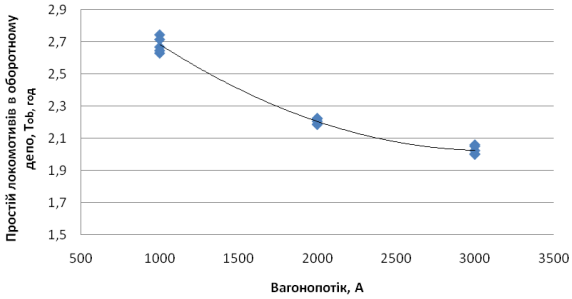
На рис. 5.12 а-г показані залежності показників локомотивного парку від обсягів вагонопотоку на напрямку. Із збільшенням обсягів роботи зменшується оборот локомотивів. Це пояснюється зменшенням простоїв локомотивів в оборотному та основному депо в очікуванні поїздів. Необхідний локомотивний парк збільшується практично пропорційно кількості поїздів на напрямку.



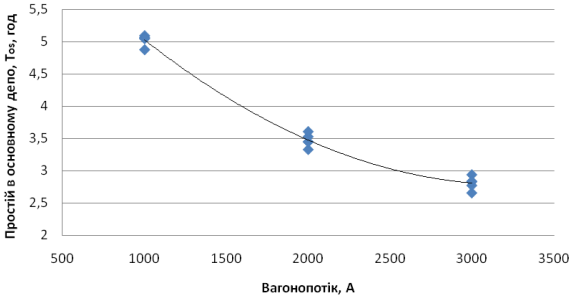
а)



б)



в)



г)

Рис. 5.12 – Залежність показників роботи залізничного напрямку від обсягів вагонопотоку

На рис. 5.13 показано вплив зміни довжини (відповідно і маси) поїздів на показники роботи напрямку. Із збільшенням довжини поїздів збільшується тривалість їх знаходження на дільниці, зменшується дільнична швидкість і, відповідно, збільшується оборот локомотиву та зменшується їх середньодобовий пробіг. Коефіцієнти кореляції між середньою тривалістю знаходження вагону

на напрямку без урахування простою на технічних станціях, між дільничною швидкістю поїздів та середньою кількістю вагонів у составі складають відповідно 0,76 та - 0,79 (рис. 5.13 а, в).

При збільшенні кількості пасажирських поїздів, що прямують на напрямку (рис. 5.13 б,г), збільшується його завантаження, при практично постійному коефіцієнті зняття вантажних поїздів пасажирськими і, як наслідок, зменшується дільнична швидкість. При наближенні коефіцієнту завантаження до 1, можуть виникати нелінійні зміщення функції як в більшу так і меншу сторону [56].

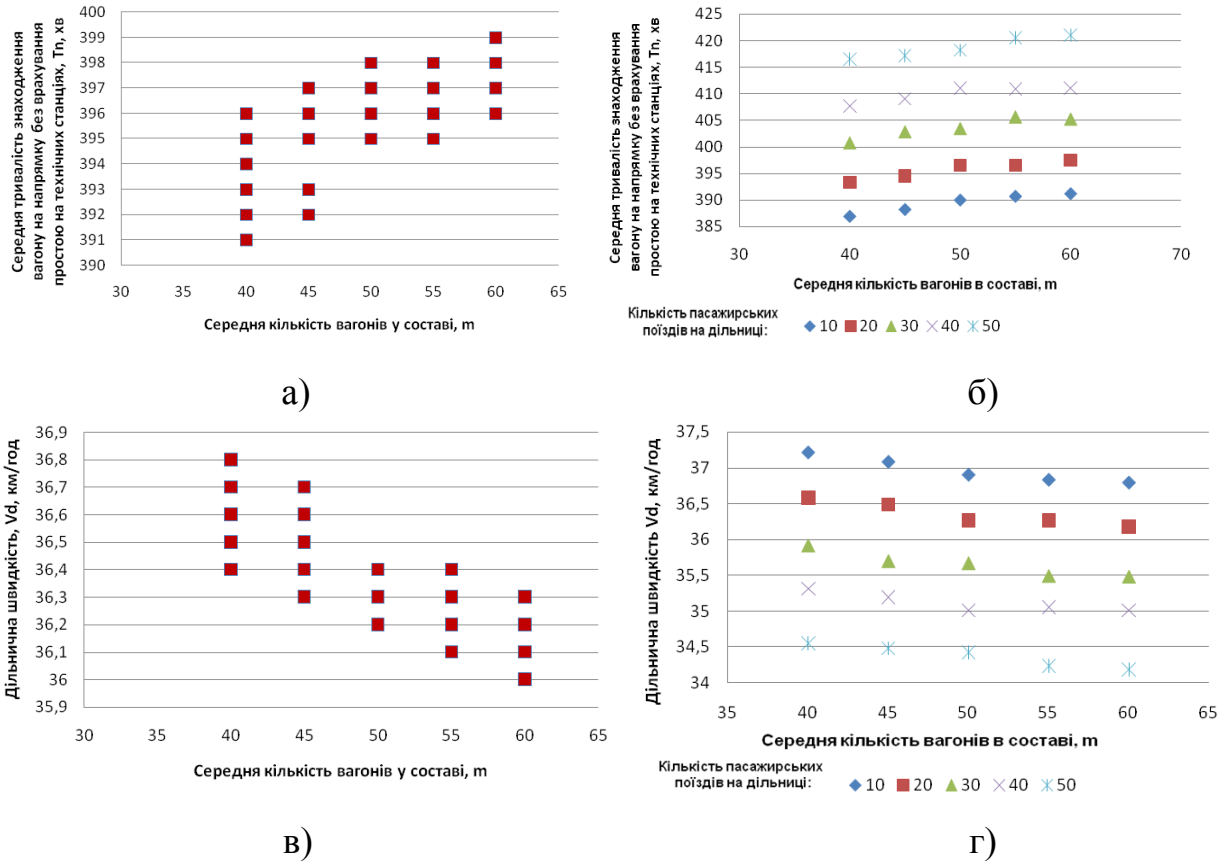


Рис. 5.13 – Залежність показників роботи залізничного напрямку від довжини поїздів

Із збільшенням кількості вагонів у складі поїздів необхідна кількість локомотивів експлуатаційного парку зменшується (рис. 5.14 а). При більшій завантаженості напрямку необхідний локомотивний парк збільшується на 5-10%. Середньодобовий пробіг локомотивів та їх оборот є функцією кількості поїздів на напрямку (рис. 5.14 б,в). При постійному вагонопотоці перший показник буде зменшуватись із збільшенням довжини та маси поїздів, а другий буде збіль-

шуватись прямо пропорційно.

Представлена модель також дозволяє визначити взаємозв'язок між показниками роботи залізниць. Наприклад, на рис. 5.14 г показано, що продуктивність роботи локомотивного парку зменшується по мірі збільшення мінімально необхідного експлуатаційного парку локомотивів для виконання заданого обсягу роботи.

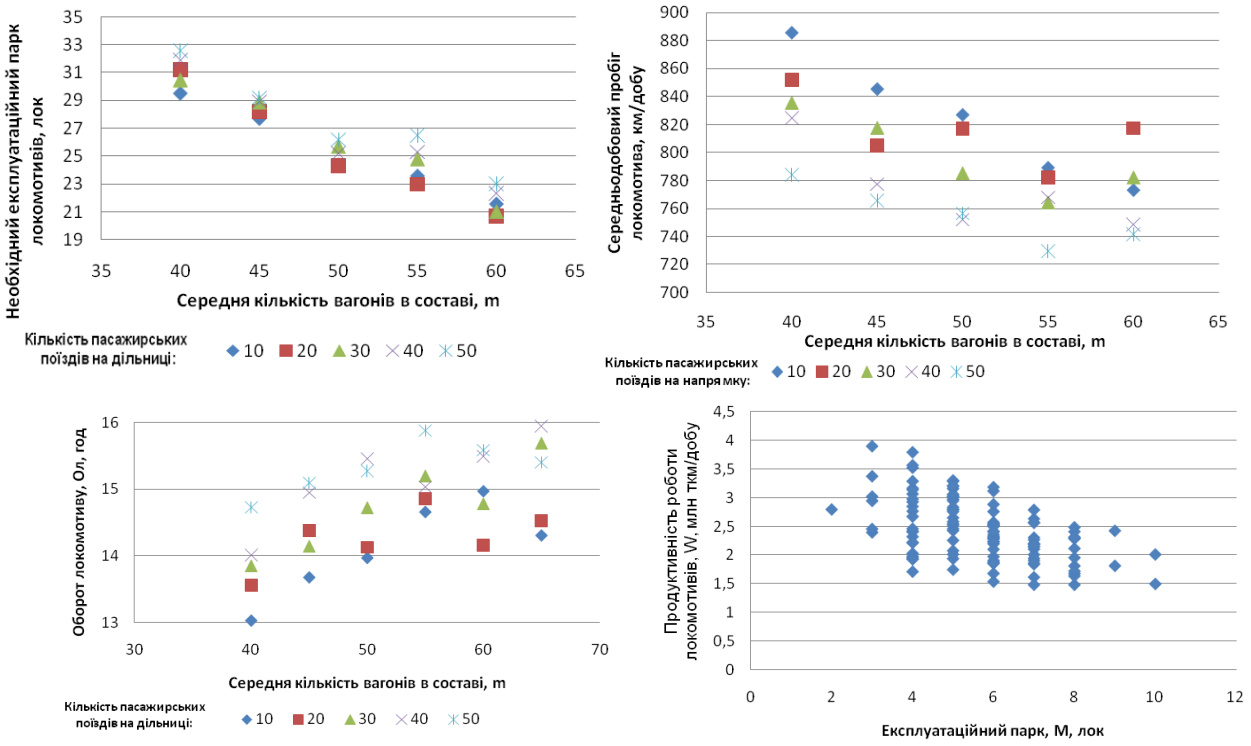


Рис. 5.14 – Показники роботи локомотивного парку

Оскільки швидкість просування вагонопотоків по напрямкам значно залежить від простою вагонів на технічних станціях: близько 12-15% часу вагон знаходиться в русі, близько 35-40% - на технічних станціях в процесі доставки (не під вантажними операціями) [132], то для остаточних висновків щодо вибору раціональної технології необхідно показники роботи станцій та напрямків розглянути в комплексі як єдину синергетичну систему.

5.3 Результати розрахунків експлуатаційних витрат по просуванню вагонопотоку

Для вибору раціональних параметрів поїздів на залізничному напрямку з метою мінімізації загальних витрат залізниць на просування вагонопотоку роз-

глянемо складники цих витрат: витрати на електроенергію чи дизельне паливо, на утримання локомотивів та локомотивних бригад, на експлуатацію та простій рухомого складу:

$$E = E_{\text{проб}} + E_{\text{лок}} + E_{\text{лок-бр}} + E_{\text{ваг}} \tag{5.62}$$

де $E_{\text{проб}}$ – витрати на пробіг поїздів заданої маси та довжини;

$E_{\text{лок}}$ – витрати на локомотиво-години роботи для пропуску заданого вагонопотоку;

$E_{\text{лок-бр}}$ – витрати на утримання локомотивних бригад;

$E_{\text{ваг}}$ – витрати на знаходження вагонопотоку в межах напрямку (з урахуванням технічних станцій).

Результати розрахунків витрат для вагонопотоку 700 ваг/добу та не літнього графіку руху пасажирських поїздів, отримані на основі імітаційного моделювання, представлені на рис. 5.15-5.17.

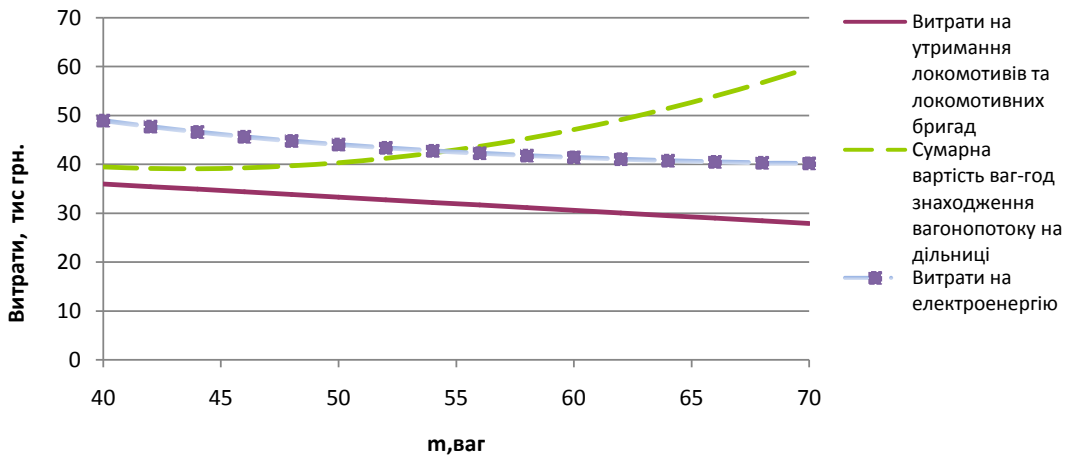


Рис. 5.15 – Залежність витрат від кількості вагонів у составі поїзда

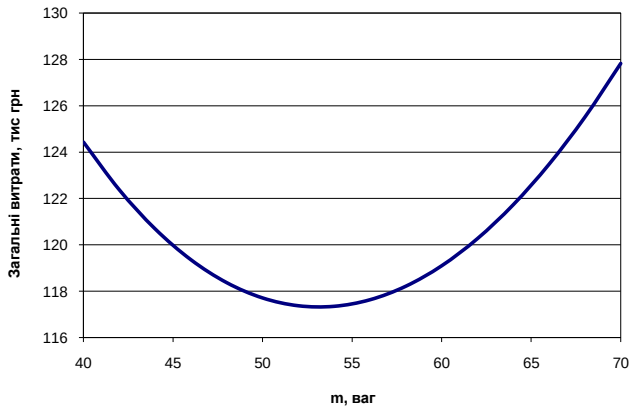


Рис. 5.16 – Залежність загальних витрат від кількості вагонів у составі поїзда

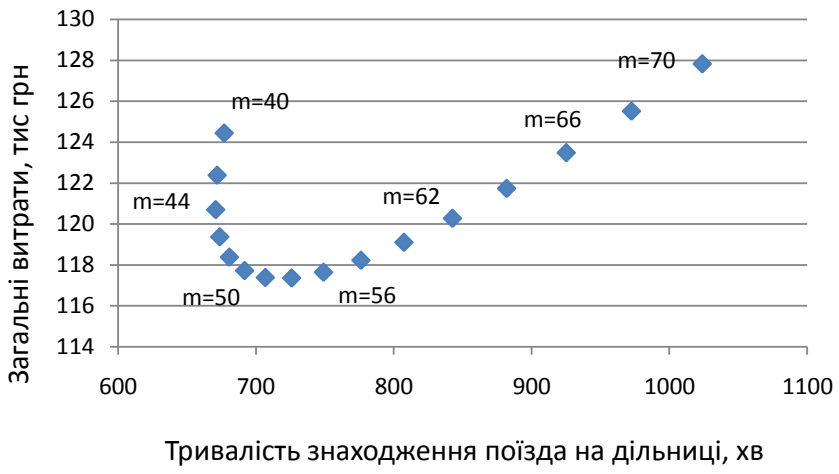


Рис. 5.17 – Залежність загальних витрат від тривалості знаходження поїздів на напрямку

Отже, для прискорення пропуску вагонопотоків на залізничних напрямках із нормальною завантаженістю дільниць необхідно формувати поїзди довжиною 44-46 вагонів масою в межах 3000-3500 т. Мінімізація загальних витрат має місце при формуванні поїздів довжиною 50-54 вагони. Також інтерес викликає вивчення залежності окремо експлуатаційних витрат за рахунок зменшення швидкості просування вагонопотоку по напрямку (рис. 5.18). Аналіз результатів показує необхідність формування довгосоставних поїздів підвищеної маси (60-70 ваг, 4200-5000 т).

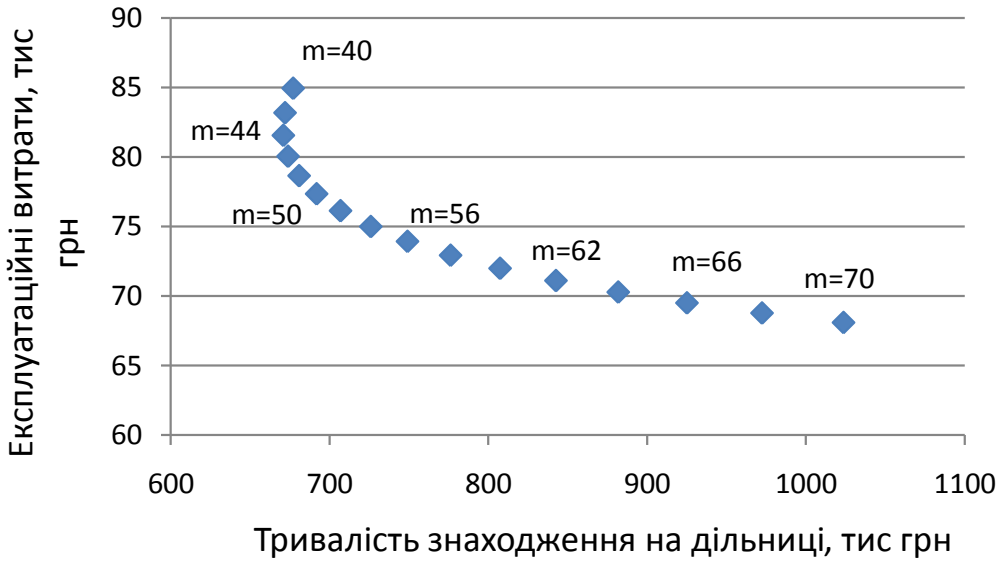


Рис. 5.18 – Залежність експлуатаційних витрат від тривалості знаходження поїздів на напрямку

При значній завантаженості дільниць напрямку, наприклад при літньому графіку руху пасажирських поїздів, доцільним стає формування неповносоставних неповновагових вантажних поїздів для прискорення пропуску вагонопотоків на напрямку. При цьому мінімум експлуатаційних витрат також має місце при формуванні довгосоставних поїздів (рис 5.19-5.21).

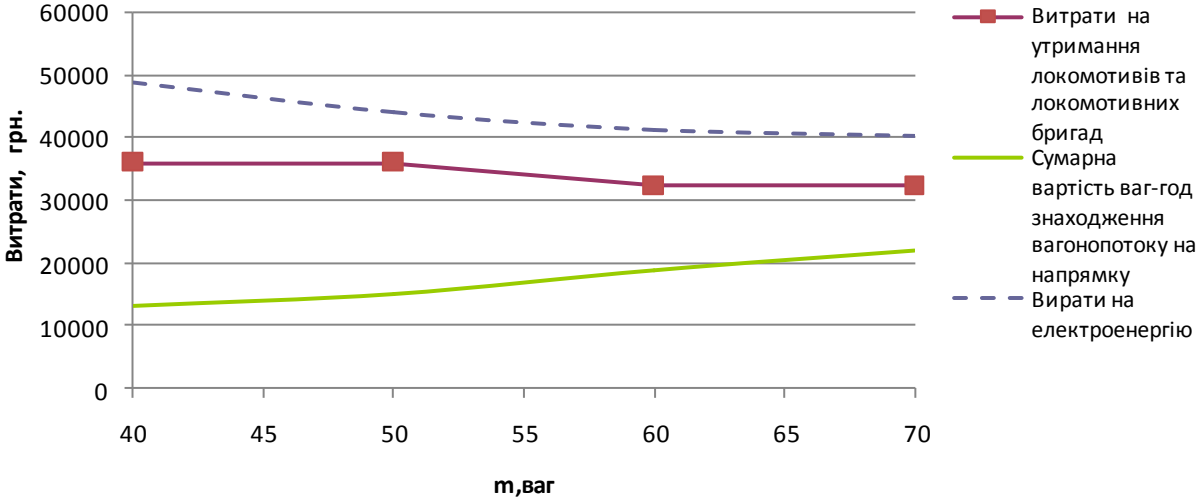


Рис. 5.19 – Залежність витрат від кількості вагонів у составі поїзда при завантажених дільницях напрямку

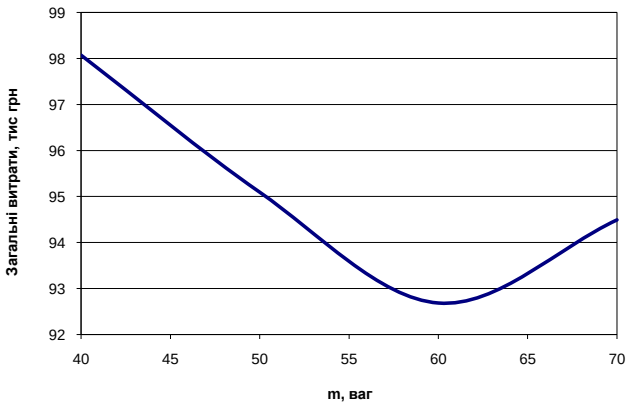


Рис. 5.20 – Залежність загальних витрат від кількості вагонів у составі поїзда при завантажених дільницях напрямку

Інша тенденція спостерігається на пасажиронапружених і одночасно завантажених напрямках. Тривалість пропуску вагонопотоку значно збільшується із зростанням кількості вагонів у составах поїздів та їх маси. Мінімум загальних витрат з урахуванням використання рухомого складу досягається при довжині составів близько 60 вагонів, а експлуатаційні витрати поступово зменшуються на всьому проміжку можливих значень довжини поїздів.

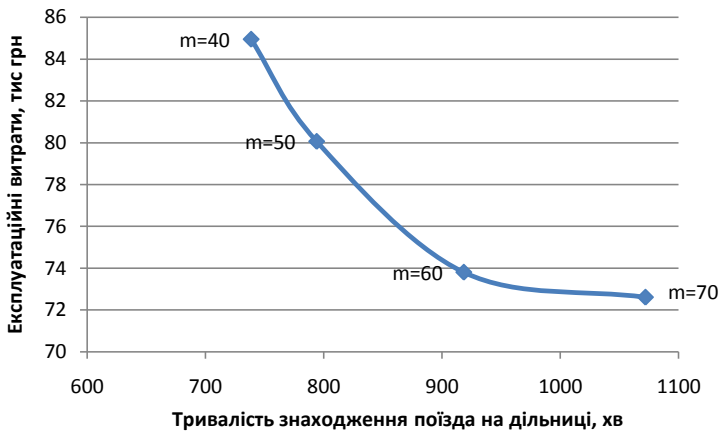


Рис. 5.21 – Залежність експлуатаційних витрат від тривалості знаходження поїздів на напрямку при завантажених дільницях

Обмеженням зменшення експлуатаційних витрат може виступати довжина приймально-відправних колій технічних та проміжних станцій напрямку.

5.4 Висновки

На мікрорівні ергатичне моделювання показало, що не можна знехтувати завантаженістю виконавців, оперативно-диспетчерського апарату та елементів, що приймають участь у технологічних процесах. Було встановлено, що тривалість знаходження поїздів в приймально-відправних та транзитних парках станцій можна представити у вигляді функції двох змінних $t = f(m, N)$, тобто частина часу знаходження припадає на кількість вагонів у поїздах m, а частина на кількість самих поїздів N. Не врахування впливу кількості вагонів у поїзді на роботу приймально-відправних та транзитних парків станцій напрямку призводить до заниження експлуатаційних витрат на 10-15% і відповідних похибок при оптимізації маси поїздів.

Результати моделювання на макрорівні дозволили визначити взаємозв’язок між параметрами поїздопотоків та основними експлуатаційними показниками роботи залізничних напрямків. Так, із збільшенням обсягів роботи поступово зменшується оборот локомотивів, що пояснюється зменшенням простоїв локомотивів в оборотному та основному депо в очікуванні поїздів. Необхідний локомотивний парк збільшується пропорційно кількості поїздів на напрямку. Із збільшенням маси та довжини поїздів збільшується тривалість їх знаходження на напрямку, оборот локомотиву, зменшується дільнична швид-

кість. Отримано нелінійну залежність тривалості знаходження поїздів на напрямку від їх довжини та маси.

Для техніко-економічної оцінки раціональних параметрів поїздопотоків використано методи факторних експериментів та регресійного аналізу. Отримано залежності, що враховують витрати на енергоресурси, використання локомотивного та вагонного парку. Встановлено, що збільшення маси поїздів призводить до зменшення витрат залізниці, що пов'язані з пропуском поїздопотоків у відношенні 3-5 : 1 в залежності від профілю дільниць.

РОЗДІЛ 6
ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОЇЗДОПОТОКІВ НА ЗАЛІЗНИЧНИХ НАПРЯМКАХ

Проведений аналітичний огляд літератури показав, що визначення раціональних параметрів поїздопотоків є складною оптимізаційною задачею. З масою та довжиною поїздів пов'язані наявна провізна і пропускна спроможність залізничних ліній, швидкість доставки вантажів, потреба у вагонному і локомотивному парках, і як результат, витрати залізниці на переміщення вагонопотоків. Існуюча технологія перевезення вантажопотоків на українських залізницях передбачає близько 50 % часу обігу вантажних вагонів у стані переміщення між станціями призначення та відправлення і 50 % у стані навантаження-розвантаження та порожнього пробігу. Зміна параметрів поїздопотоків може вплинути на першу частину часових витрат, тобто частково прискорити або сповільнити пропуск вантажопотоків і відповідно вплинути на обіг вантажних вагонів.

В наукових роботах використовувалися різні методи рішення зазначеної задачі та різні критерії оптимальності. Як показав аналіз, такими критеріями можуть виступати прямі експлуатаційні витрати при заданому рівні технічного використання локомотивів, критерій, виражений в приведених вагоно-годинах, що враховує витрати локомотиво-годин та енергії через коефіцієнти приведення, формування переважно повносоставних та повновагових поїздів, тощо. При оптимізації параметрів поїздопотоків на напрямках використовувались й інші підходи щодо визначення критерію оптимізації, окрім власне витрат залізниці. В умовах конкуренції залізниці з іншими видами транспорту, в роботах [133–135] наводиться обґрунтування зменшення маси та довжини поїздів для прискорення пропуску контейнерних або контрейлерних поїздів, чи окремих вантажних відправок за додаткову плату. Недоліками цих методів є відсутність системного аналізу проблеми з точки зору інтересів обох учасників процесу перевезень.

6.1 Математична постановка задачі

Задача визначення раціональних параметрів поїздопотоків на залізничних

напрямках розглядається як оптимізаційна задача із двома невідомими – масою Q (т) та довжиною поїздів m (ваг). Критеріями оптимізації виступають витрати учасників логістичного ланцюгу вантажопотоків:

$$\begin{bmatrix} C_з = E_З(m,Q) \to \min \\ C_{кл} = E_{вант}(m,Q) + E_{зб}(m,Q) \to \min, \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

де $E_З$ – витрати залізниці на переміщення поїздопотоків на напрямку;

$E_{вант}$ – витрати вантажовласників на закупівлю вантажів, що постійно знаходяться в русі під час перевезень;

$E_{зб}$ – витрати на зберігання вантажів на складах відправників та одержувачів.

Всі вищезазначені витрати розглядаються як функції двох параметрів m та Q при постійних значеннях інших параметрів, таких як добовий вагонопотік по напрямку A ваг/добу, наявна пропускна спроможність $N_н$, максимальна довжина приймально-відправних колій $l_{кол}$, максимальна маса поїздів на дільницях напрямку при існуючих поїзних локомотивах $Q_{мах}$, т, добовий вантажопотік на напрямку $P_{вант}$ т/добу, доля порожнього вагонопотоку в переважно порожньому напрямку $\alpha_{пор}$, обсяги пасажирського руху при літньому та не літньому графіку руху поїздів $N_{пас}$, поїздів/добу, середня тара вагонів, $q_т$, т, середня вантажопідйомність вагонів, $q_{ваг}$, т/ваг, локомотивний парк $W_л$.

Витрати Укрзалізниці на пропуск поїздопотоків складаються із наступних складових:

$$E_З = E_{проб} + E_{лок} + E_{лок-бр}, \quad (6.2)$$

де $E_{проб}$ – витрати на пробіг поїздів заданої маси та довжини, що припадають на витрати електроенергії чи дизельного палива;

$E_{лок}$ – витрати, що припадають на локомотиво-години роботи для пропуску заданого вагонопотоку;

$E_{лок-бр}$ – витрати на утримання локомотивних бригад.

Витрати клієнтів на закупівлю вантажів розраховуються за формулою:

$$C_в = A\alpha_{нав} q c_m d_{ст} t_{дост} (1 + \frac{t^*_{напр}}{t_{напр}}), \quad (6.3)$$

де A – добовий вагонопотік в одному напрямку;

$\alpha_{нав}$ – доля навантажених вагонів від загального вагонопотоку;

q – середнє навантаження вагону на напрямку;

c_m – середньозважена вартість однієї тонни вантажу;

$d_{ст}$ – дисконтна ставка;

$t_{дост}$ – середня тривалість знаходження вантажу в русі від станції завантаження до станції призначення;

$t^*_{напр}$ – тривалість знаходження вантажу на напрямку при змінених параметрах поїздопотоків;

$t_{напр}$ – тривалість знаходження вантажу на напрямку при існуючих параметрах поїздопотоків.

Витрати на зберігання вантажу змінюються пропорційно величинам партій доставок m (рис. 6.1), що відповідає кількості вагонів у составах поїздів. Розрахувати ці витрати для окремого состава можна за формулою:

$$E_{зб} = 0,5mc_sT \tag{6.4}$$

де c_s – середні витрати на зберігання вантажу, грн/год;

T – середня тривалість споживання однієї партії вантажу, год. Очевидно, що цей параметр пропорційний величині партії m.

Система обмежень параметрів функції складається з наступних рівнянь та нерівностей.

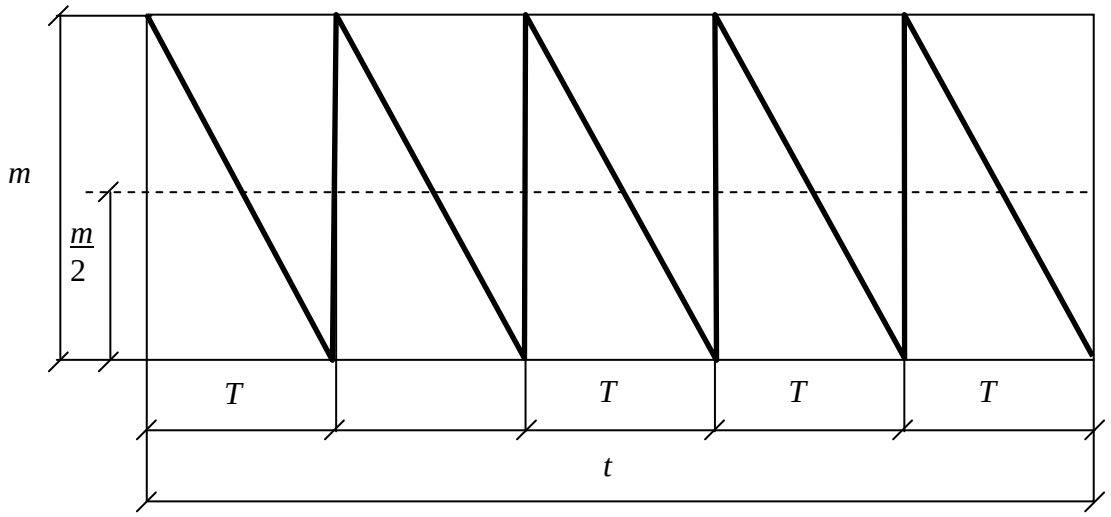


Рис. 6.1 – Графік функції обсягів вантажу, що зберігається

Обмеження по наявній пропускній спроможності дільниць напрямку:

$$N_н \geq N_{вант\,j} + N_{пас\,j} \cdot \varepsilon_{пас} + N_{зб\,j}(\varepsilon_{зб} - 1) \qquad (6.5)$$

де $N_{вант\,j}$, $N_{пас\,j}$, $N_{зб\,j}$ – кількість вантажних, пасажирських та збірних поїздів на *j*-му напрямку;

$\varepsilon_{пас}, \varepsilon_{зб}$ – коефіцієнти зняття вантажних поїздів пасажирськими та збірними відповідно.

Коефіцієнти зйому в свою чергу також залежать від параметрів поїздопотоків. Відповідно до [136, 137] для двоколійних дільниць з пасажирським рухом до 60 пар поїздів на добу:

$$\varepsilon_{пас} = \frac{t_{ван}(1-\Delta)(0,8-0,005n_{пс})}{I} + 1,3 \qquad (6.6)$$

та при більш значних розмірах руху пасажирських поїздів

$$\varepsilon_{пас} = \frac{t_{ван}(1-\Delta)(0,8-0,005n_{пс})}{I} + \frac{1,5}{n_{пс}} + 1 \qquad (6.7)$$

де $t_{ван}$ – тривалість руху вантажного поїзду через обмежуючий перегін, хв.;

Δ – співвідношення чистого часу руху пасажирських та вантажних поїздів на розрахунковій дільниці;

$n_{пс}$ – загальна кількість пасажирських поїздів на дільниці;

I – розрахунковий міжпоїзний інтервал на дільниці, хв.

Параметр *I* залежить від [136] тривалості руху поїздів по розрахунковим блок-ділянкам $t_{бл\,i}, i = \{1..4\}$, їх довжини $l_{бл\,i}$ та довжини $l_{п1}$ та $l_{п2}$ суміжних поїздів, що рухаються по перегону:

$$I = t_{бл1}\frac{l_{п1}}{l_{бл1}} + t_{бл2} + t_{бл3} + t_{бл4}\frac{l_{п2}}{l_{бл4}} \qquad (6.8)$$

Для аналізу форми області допустимих значень ОДЗ параметрів поїздопотоків проведено факторний експеримент. При цьому для визначення $t_{бл\,i} = f(Q,m)$ використовувались тягові розрахунки на одній з дільниць напрямку перевезень.

Наступним обмеженням виступає відповідність добового обсягу вагонопотоків добовому поїздопотоку:

$$A = mN_{вант}. \tag{6.9}$$

Обмеження по довжині приймально-відправних колій:

$$l_{лок} + m \cdot l_{ваг} + a \le l_{кол}, \tag{6.10}$$

де $l_{лок}$ – довжина поїзного локомотиву на напрямку, м;

$l_{ваг}$ – середня довжина вагону, м;

a – допуск на неточність зупинки поїзда, м.

Обмеження по силі тяги поїзних локомотивів:

$$Q_{бр} = \frac{F_{кр} - P(\omega_0^{'} + i_p)}{\omega_0^{''} + i_p} \ge Q, \tag{6.11}$$

де $F_{кр}$ – розрахункова сила тяги локомотива, кгс;

$\omega_0^{'}$ – основний питомий опір руху локомотива, кгс/тс;

i_p – керівний ухил, ‰;

P – розрахункова маса локомотива, тс;

$\omega_0^{''}$ – основний питомий опір руху вантажних вагонів, кгс/тс.

Обмеження по обсягам перевезених вантажів:

$$(1 - \alpha_{пор}) N_{вант\ j} (Q - mq_m) = P_{вант\ j} \tag{6.12}$$

Обмеження по вантажопідйомності вагонів:

$$0 \le \frac{Q}{m} - q_m \le q_{ваг} \tag{6.13}$$

Обмеження по локомотивному парку

$$\frac{N_{вант} O_л}{24} \le W_л, \tag{6.14}$$

де $O_л$ – оборот локомотиву.

6.2 Методика і результати досліджень

Визначення раціональних параметрів поїздопотоків проведено на основі кримського пасажиронапруженого напрямку залізничних перевезень з урахуванням різного стану його завантаження в літній та нелітній період. На рис. 6.2 побудована область допустимих значень параметрів поїздопотоків.

Обмеження (5`) та (5``) відповідають не літнім та літнім розмірам руху пасажирських поїздів на напрямку. Конус, утворений обмеженнями (6.12)-

(6.13), пояснюється співвідношенням випадкових параметрів *m* та *Q*. Величина кута при вершині пропорційна долі порожнього вагонопотоку на напрямку. Обмеження (6.14) паралельне обмеженням (6.5) та коливається в межах між (5`) та (5``), оскільки локомотивний парк напрямку може використовуватись на суміжних напрямках, бути доповнений локомотивами інших депо. І, як показали дослідження, оборот локомотиву не може бути прийнятий постійною величиною, оскільки він залежить від параметрів та обсягів поїздопотоків.

Дослідження впливу параметрів поїздопотоків на витрати залізниці для Кримського пасажиронапруженого напрямку проведено з використанням моделі роботи залізничного напрямку [124]. В моделі він розглядається як багатоканальна багатофазна система масового обслуговування СМО. Вхідний потік СМО утворюють парні та непарні поїзди, що вимагають пропуску по дільницям напрямку, закони розподілу та параметри якого представлені в [100]. Фазами обслуговування поїздів є залізничні перегони та станції, що здійснюють технологічні процеси відповідно до прийнятої технології роботи дирекції залізничних перевезень та технологічних процесів роботи станцій напрямку.

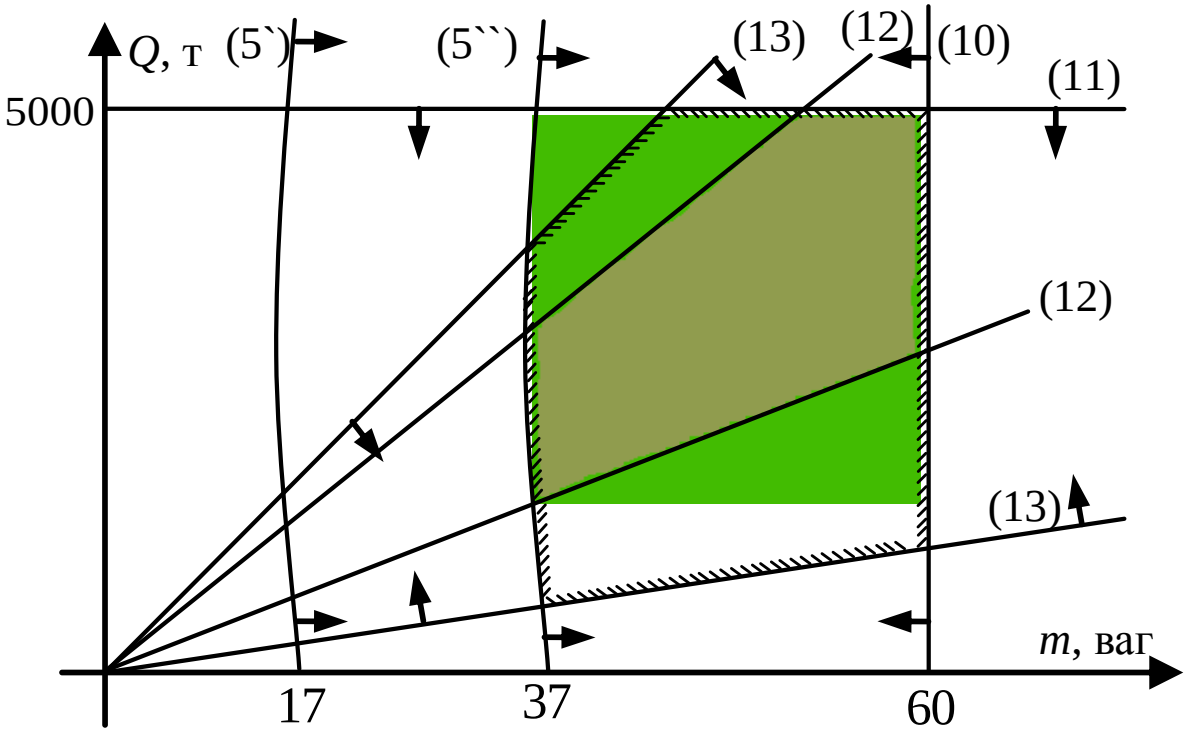


Рис. 6.2 – Область допустимих значень параметрів поїздопотоків

Тривалості обслуговування моделюються як випадкові величини, параметри яких залежать від характеристик заявок на обслуговування та об’єктів об-

слуговування.

Результати досліджень показали, що із збільшенням довжини та маси поїздів на напрямку, витрати залізниці зменшуються (рис. 6.3) і одночасно з ними збільшується тривалість знаходження вагонопотоків на напрямку.

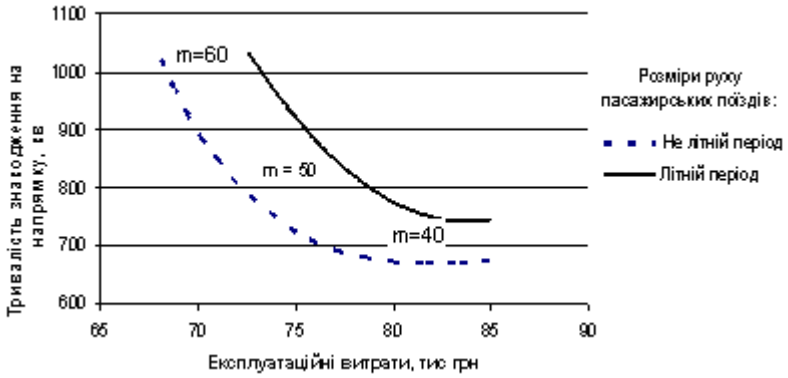


Рис. 6.3 – Залежність експлуатаційних витрат від тривалості знаходження поїздів на напрямку

Для визначення витрат $E_{вант}$ та $E_{зб}$ виконано статистичний збір інформації про структуру, обсяги та вартість вантажопотоків, що перевозились Укрзалізницею за останні роки [138]. На рис. 6.4 наведено розподіл вантажопотоків по роду вантажів. Переважну частину вантажів складають масові перевезення видобувної, металургійної, будівельної та аграрної промисловості.

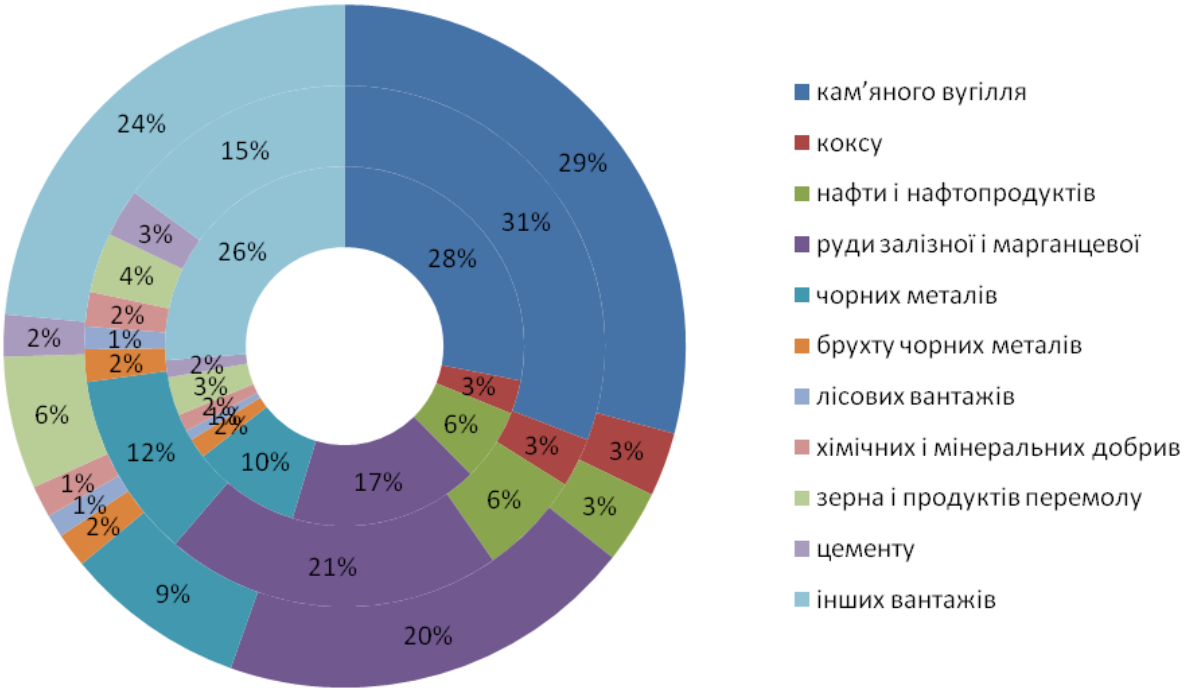


Рис. 6.4 – Діаграма зміни структури вантажопотоків залізниць України за 2002, 2005 та 2010 р.

Діаграми зміни структури вантажопотоків у 2002, 2005 та 2010 р., що в останнє десятиріччя відбувається зміна кон'юнктури ринку вантажних перевезень. Одночасно з цим змінювався попит та пропозиція на окремі товари, що перевозилися залізницями України, деякі групи вантажів стали транспортуватись іншими видами транспорту або перевозитись шляхами в обхід території України (рис. 6.5).

Все це вплинуло на собівартість самих вантажів (рис. 6.6). Середньозважена вартість однієї тонни вантажу визначена за формулою:

$$C_в = \sum_{j=1}^{k} \alpha_j c_{вантj} , \qquad (6.15)$$

де j – род вантажів;

α_j – доля вантажів j-го роду від загального обсягу вантажопотоку;

$c_{вантj}$ – середня вартість j-го вантажу протягом року.

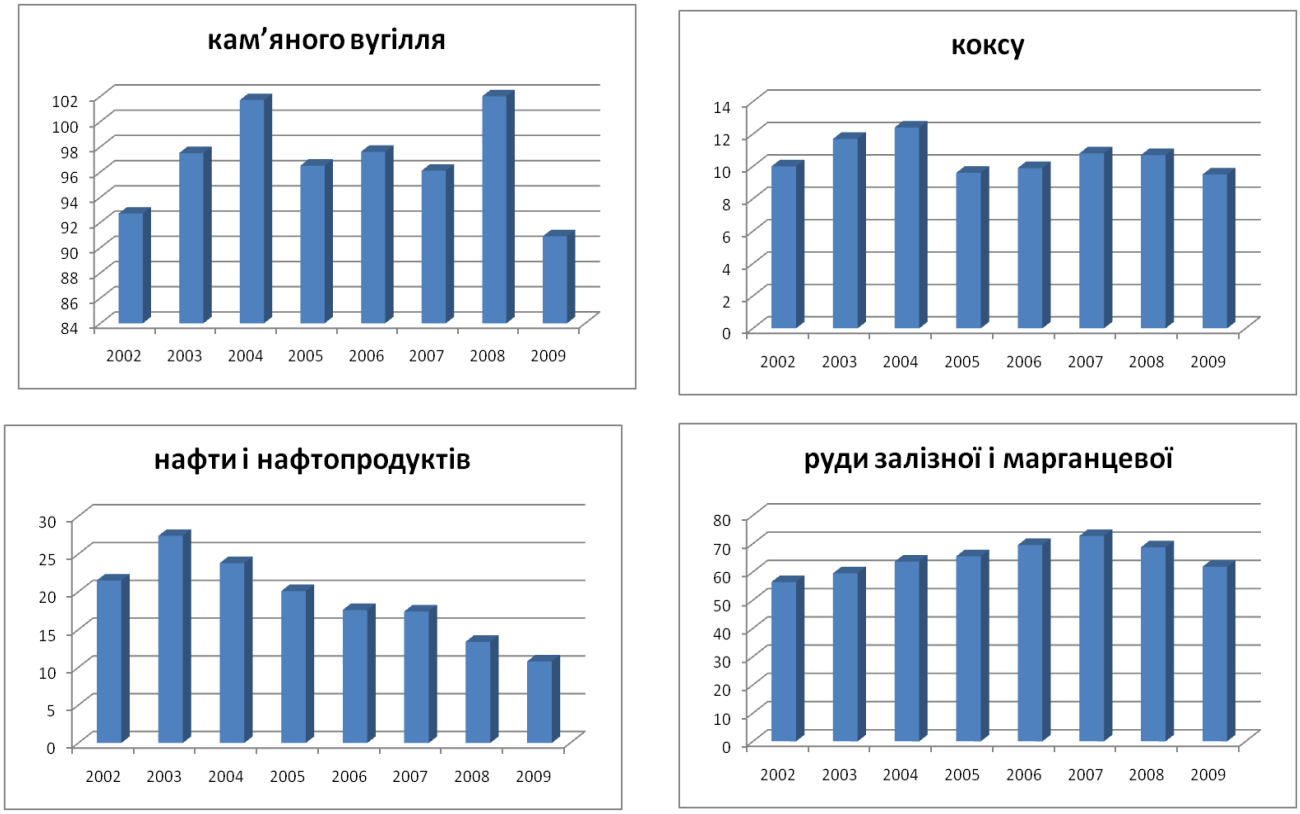


Рис. 6.5 – Діаграма зміни обсягів вантажопотоків залізниць України за родом вантажів

Аналіз зміни вартості масових вантажів, що перевозилися залізницями з 2002 по 2010 р., показав значні коливання, що пояснюються зміною попиту та обсягів споживання тих чи інших вантажів на ринку України. Між середньозваженою вартістю та обсягами перевезень було встановлено тісний кореляційний зв'язок $R_{c_в \sum Q} = 0,77$.

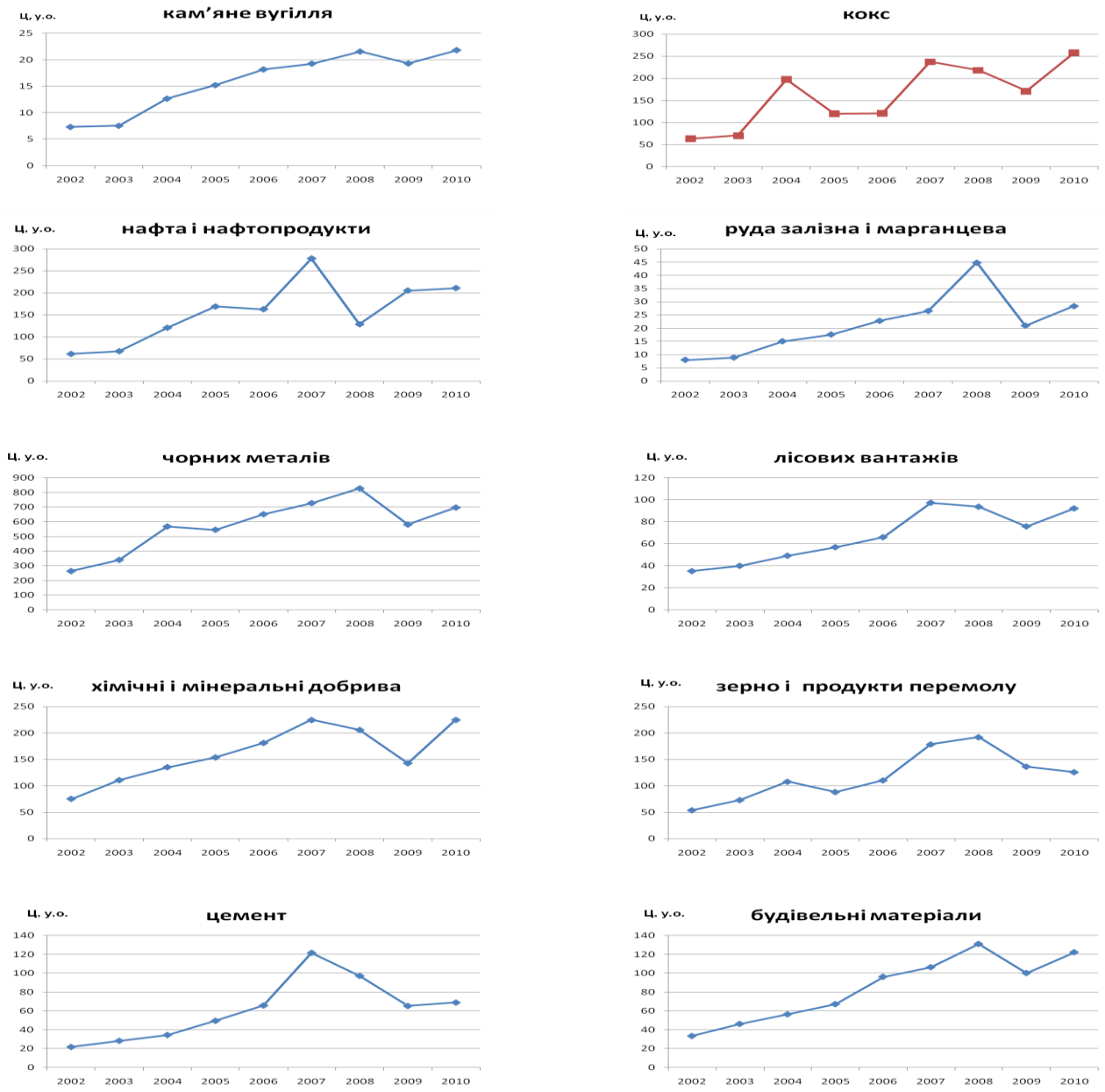
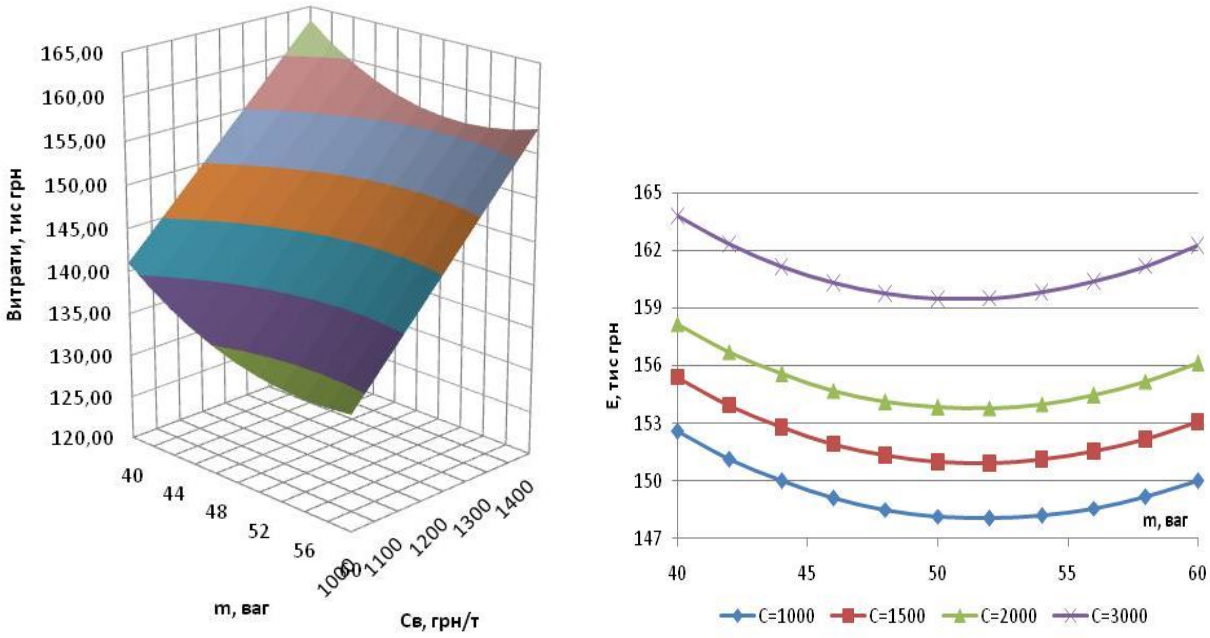


Рис. 6.6 – Зміна вартості масових вантажів, що перевозилися залізницями протягом 2002 – 2010 р.

Для визначення параметрів поїздопотоків, що задовольняють умову (6.1), була побудована поверхня $E = f(m; c_в)$ (рис. 6.7 а). Для наочності виконані розтини поверхні площинами при деяких постійних значеннях параметру $c_в$ (рис.

6.7, б), з яких видно, що загальні витрати учасників процесу перевезень досягають мінімального значення при зменшенні довжини поїздів до 48-54 вагонів у составі в залежності від співвідношення витрат на перевезення та вартості перевезених вантажів.



а) б)

Рис. 6.7 – Поверхня $E = f(m; c_в)$ (а) та її розтини (б)

В подальшому задачу визначення раціональних параметрів поїздопотоків вирішено як задачу векторної оптимізації. Розв'язок такої задачі полягає у пошуку усіх пар параметрів поїздопотоків, які задовольняють умові (6.1) при будь якому співвідношенні витрат між собою $t = \dfrac{C_з}{C_{кл}}$. Функції витрат залізниці та її клієнтів представлені на рис. 6.8. При двох невідомих значеннях *m* та *Q*, вони повинні задовольняти наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial C_з(m,Q)}{\partial m} + t\dfrac{\partial C_{кл}(m,Q)}{\partial m} = 0, \\ \dfrac{\partial C_з(m,Q)}{\partial Q} + t\dfrac{\partial C_{кл}(m,Q)}{\partial Q} = 0, \end{cases} \tag{6.16}$$

Розв'язок цієї системи рівнянь для функцій витрат кримського напрямку залізничних перевезень отримано з використанням програмного засобу *Maple 7* (рис. 6.9).

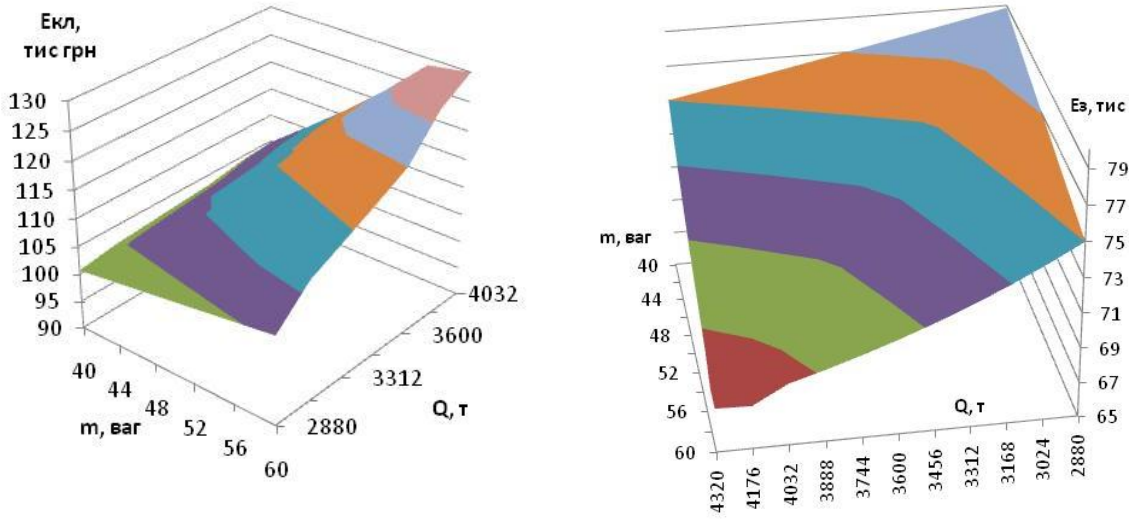


Рис. 6.8 – Поверхні $E_{кл} = f(m;Q)$ та $E_з = f(m;Q)$

Так, при $t \notin \{1,58; 4,42\}$ значення оптимальних параметрів поїздопотоків знаходяться на границі ОДЗ, при $\forall t \in \{1,58; 4,42\}$ рішення буде мати вигляд деякої кривої (рис. 6.10, а). Необхідно зазначити, що пошук виконувався відносно стандартних параметрів поїздопотоків, що задавалися б в тих чи інших випадках на напрямку, а справжні експлуатаційні значення $\tilde{m}$ та $\tilde{Q}$ незначно коливалися один від одного в будь-якій точці отриманої функції $Q = f(m) \forall t \in \{1,58; 4,42\}$ (рис 6.10, б).

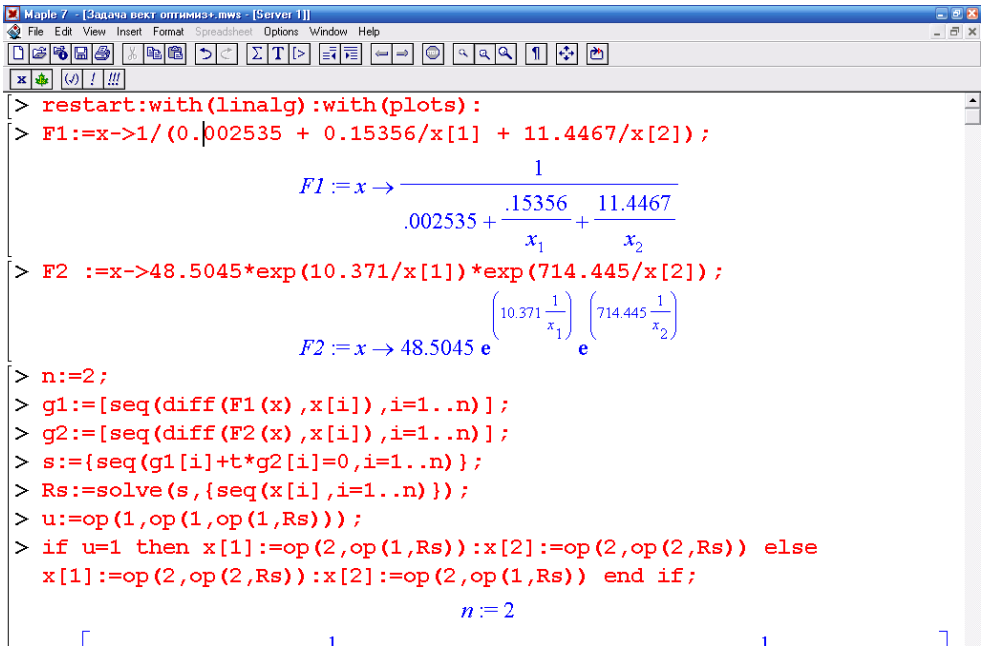
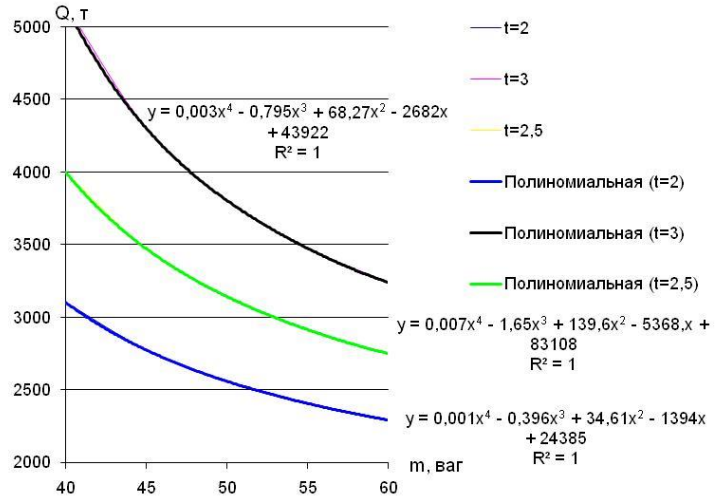
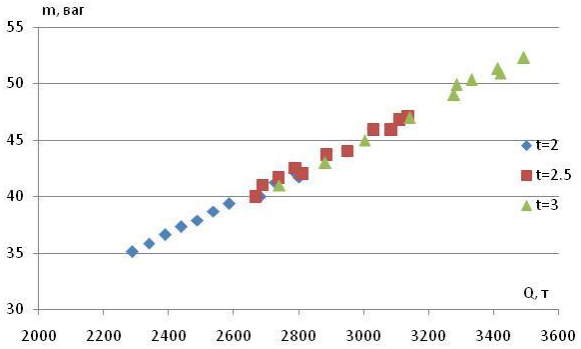


Рис. 6.9 – Фрагмент вікна програмного засобу *Maple 7*



а)



б)

Рис. 6.10 – Розв’язок задачі векторної оптимізації

Таким чином, при зменшенні обсягів перевезень на залізниці виникає проблема прискорення руху поїздопотоків в зв’язку із збільшенням тривалості простою вагонів на технічних станціях під накопиченням для запобігання виплати штрафів за несвоєчасну доставку вантажів клієнтам. Насправді ж, в цей період часу відбувається зменшення вартості вантажної маси, що знаходиться в русі, і тому її перевезення може бути виконано в більш довші строки із максимально можливим збільшенням довжини та маси поїздів та відповідним зменшенням експлуатаційних витрат залізниці. При збільшенні обсягів перевезення відбувається поступове збільшення вартості вантажів, тому в цей час раціональним стає зменшення маси та довжини поїздів, що призведе до прискорення просування поїздопотоків по напрямках з організацією руху неповносоставних поїздів довжиною 42-50 вагонів в залежності від роду вантажопотоків на напрямку та їх обсягу.

6.3 Висновки

Виконаний аналіз наукових робіт по проблемі вибору раціональних параметрів поїздопотоків на залізничних напрямках показав, що в сучасних умовах відсутній комплексний підхід до розв'язання задачі вибору маси та довжини поїздів. В існуючих наукових роботах вплив параметрів поїздопотоків розглядається в аспектах експлуатаційної роботи станцій та дільниць, а клієнти залізниці при цьому знаходяться поза межами системи перевезень і ніяким чином не можуть вплинути на строки доставки вантажів, окрім збільшення партій відправок. Для розв'язання вказаної задачі побудовані математичні моделі технологічних процесів роботи залізничних станцій та напрямків і розроблено методику техніко-експлуатаційної та техніко-економічної оцінки вибору параметрів поїздопотоків.

При зменшенні обсягів перевезень на залізниці виникає проблема прискорення руху поїздопотоків в зв'язку із збільшенням тривалості простою вагонів на технічних станціях під накопиченням для запобігання виплати штрафів за несвоєчасну доставку вантажів клієнтам. Насправді ж, в цей період часу відбувається зменшення вартості вантажної маси, що знаходиться в русі, і тому її перевезення може бути виконано в більш довші строки із максимально можливим збільшенням довжини та маси поїздів та відповідним зменшенням як експлуатаційних витрат залізниці, так і тарифів на перевезення. При збільшенні обсягів перевезення відбувається поступове збільшення вартості вантажів, тому в цей час раціональним стає зменшення маси та довжини поїздів, що призведе до прискорення просування поїздопотоків по напрямках з організацією руху неповносоставних поїздів довжиною 42-50 вагонів в залежності від роду вантажопотоків на напрямку та їх обсягу. Значний вплив на вибір параметрів поїздопотоків будуть вже мати обмеження за наявною кількістю локомотивів, завантаженість дільниць та елементів станцій. Збільшення експлуатаційних витрат на пропуск поїздопотоків при цьому можна покласти на клієнтів, відповідно збільшивши тарифні ставки. Для кримського напрямку, збільшивши власні витрати на 4000 грн/добу, витрати клієнтів на утримання вантажної маси в русі скорочуються на 15000 грн. Отже, частково розподіливши скорочення загаль-

них витрат системи між її учасниками, можна отримати економічний ефект в розмірі 4 млн грн/рік лише на напрямку довжиною 200-250 км, які частково направити на реновацію локомотивного парку для усунення обмеження по парку локомотивів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Авен О. И. Оптимизация транспортных потоков / О. И. Авен, С. Е. Ловецкий, Г. Е. Моисеенко – М.: Наука, 1985. – 168 с.
2. Левин Д. Ю. Влияние маршрутизации порожних вагонов на эффективность капитальных вложений в развитие грузовых станций / Д. Ю. Левин // Тр. ВНИИЖТ, 1982. – Вып. 641. – С. 85–89.
3. Тимохин Э. Ю. Организация вагонопотоков при реконструкции станций. / Э. Ю. Тимохин // Тр. ВНИИЖТ, 1982. – Вып. 641. – С. 34–63.
4. Тулупов Л. П. Оптимизация управления перевозками на линейном уровне // Железнодорожный транспорт – 2003. – № 8. – С. 34–37.
5. Резервы улучшения эксплуатации железных дорог / Тр. БелИЖТ. – Гомель, 1971. – Вып. 106. – 63 с.
6. Некрашевич В. И. Влияние закрытия приемо-отправочных путей сортировочных и участковых станций на работу прилегающих участков / В. И. Некрашевич, А. Д. Чернюгов, Т. Н. Родькина // Тр. ВНИИЖТ, 1982. – Вып. 641. – С. 63–84.
7. Новикова А. М. Транспортная политика России на рубеже тысячелетий / А. М. Новикова // Залізн. трансп. України – 2001. – № 4. – С. 19–23.
8. Ковалев В. И. Совершенствовать организацию и управление вагонопотоками / В. И. Ковалев, А. Т. Осьминин // Железнодорожный транспорт – 2005. – № 10. – С. 29–33.
9. Авекитян М. А. Совершенствовать систему показателей эксплуатационной работы / М. А. Авекитян // Железнодорожный транспорт – 2005. – № 10. – С. 10–18.
10. Липовец Н. В. Удосконалення організації пропускання вагонопотоків // Залізничний транспорт України – 2001. – № 4. – С. 15–16.
11. Аксенов И. М. Особенности реструктуризации в современных условиях / И. М. Аксенов, В. В. Пасечник // Залізн. трансп. України. – 2001. – № 1. – С. 7-11.
12. Аналіз та обґрунтування структурних змін і параметрів вантажопотоків у

приморських транспортних вузлах України: отчет о НИР / ИКТП-Центр. – № ГР 0195U002056 – К., 1995. – 137 с.

13. Бородин А. Ф. Управление вагонопотоками в современных условиях / А. Ф. Бородин // Железнодорожный транспорт. – 1996. – № 8. – С. 54-57.
14. Тихонов К. К. Выбор оптимальных параметров эксплуатации железных дорог / К. К. Тихонов – М.: Транспорт, 1974. – 192 с.
15. Выбор способов увеличения пропускной способности железнодорожных линий / Тр. ЦНИИ МПС. – Вып. 147. – М.: Трансжелдориздат, 1958. – 246 с.
16. Левин Д. Ю. Расчет пропускной способности участка / Д. Ю. Левин Железнодорожный транспорт – 2003. – № 8. – с. 18–23.
17. Музикіна Г. І. Дослідження впливу розмірів руху на показники роботи залізничної мережі [Текст] / Г. І. Музикіна, Ю. В. Чибісов // Сборник трудов 10й Международной конференции по транспорту и логистике – 2007. – с. 166.
18. Музикина Г. И. Оптимизация распределения поездопотоков на участках железнодорожного узла [Текст] / Г. И. Музикина, Ю. В. Чибисов // Доклади XV Міжнародної конференції з автоматичного управління Автоматика –2008 – с. 381–382.
19. Форд Л.Р. Потоки в сетях [Текст] / Л. Р. Форд, Д. Р. Фалкерсон // – М.: «Мир», 1966 Перевод с англ. 372 с.
20. Березина Л. Ю. Графы и их применение: Пособие для учителей [Текст] / Л. Ю. Березина // – М.: Просвещение, 1979 – 143 с.
21. Осьминин А.Т. Организация вагонопотоков и автоматизация расчета плана формирования поездов. // Железнодорожный транспорт – 2004. – №5 – с.21–24
22. Кутах О.П. Оптимізація організації вагонопотоків на залізницях. // Збірник праць КУЕТТ. Серія «Транспортні системи і технології» – 2002 – с.88–92
23. Фельдман Э. Д., Межова Р. В., Шулько В. П. Вопросы унификации весовых норм и маршрутизации грузовых перевозок – Труды ЦНИИ МПС, вып. 186 – М.: Трансжелдориздат – 1960 – 176с.

24. Данько М. І. Модель прогнозування розподілу порожніх вагонів на дирекції залізничних перевезень із застосуванням теорії нечітких множин [Текст] // зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2005. – № 71. – С. 25-30.
25. Лаврухін О. В. Удосконалення технології розподілу вагонів на основі автоматизації змінно-добового планування [Текст] // Вісник економіки транспорту і промисловості. – 2008. – № 22. – С. 63-64.
26. Нейронные сети / под. ред. Н.Н. Куссуль. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
27. Данько М. І. Удосконалення процесу змінно-добового планування на основі застосування інтелектуальних методів [Текст] // М. І. Данько, О. В. Лаврухін, Л. І. Рибальченко, В. О. Романчук // Збірник наукових праць УкрДАЗТ – 2010. – вип. 119 – с. 7–11.
28. Бутько Т. В., Лаврухін О. В. Модель поїздоутворення на основі ситуаційної системи прийняття рішення // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2004. – № 3 [9]. –С. 30-33.
29. Богданов В. М. Резервы пропускной и провозной способности // Железнодорожный транспорт – 2004. – №2 – с. 54–58
30. Макарочкин А. М., Дьяков Ю. В. Использование и развитие пропускной способности железных дорог – М.:Транспорт, 1981. – 287с.
31. Козлов В. Е. Влияние всплесков транспортного потока на пропускную способность железнодорожных линий / Межвузовский сборник научных работ ВННИЖТа, вып.123 / В. Е. Козлов - М.: 1984. С. 4-23.
32. Батисс Ф. Грузовые перевозки на железных дорогах мира // Железные дороги мира. – 1993. – № 2. – С.13-27.
33. Бенсон Д., Уайтхед Дж. Транспорт и доставка грузов: Пер. с англ. – М.: Транспорт, 1990. –227 с.
34. Боровой Н. Е. Маршрутизация перевозок грузов. – М.: Транспорт, 1978. – 216 с.
35. Левин Д. Ю. Теория оперативного управления перевозочным процессом. Монография – М.: УМЦ ЖДТ – 2008 – 625 с.
36. Левин Д. Ю. Диспетчерские центры и технология управления перевозочным процессом. Учебное пособие. – М.: УМЦ ЖДТ – 2005 – 750 с.

37. Миронов А.Ю. Перевозочному процессу – инновационные технологии // Железнодорожный транспорт – 2004. – №8 – с. 26–31
38. Ададуров С.Є Перевозочный процесс: направления инновационного развития // Железнодорожный транспорт – 2007. – №10 – с.18–19
39. Бородин А.Ф. Новые инструктивные указания по организации вагонопотоков // Железнодорожный транспорт – 2007. – №10 – с.24–28.
40. Елисеев С. Ю. Концепция управления грузовыми перевозками в транспортных узлах с применением логистических центров // Вестник транспорта – 2006 – №2 – с.12–14
41. Елисеев С. Ю. Концепция управления грузовыми перевозками в транспортных узлах с применением логистических центров // Вестник транспорта – 2006 – №3 – с.26–29
42. Елисеев С. Ю. Концепция управления грузовыми перевозками в транспортных узлах с применением логистических центров // Вестник транспорта – 2006 – №4 – с.32–34
43. Чеклова В.М. Модель вибору стратегії надходження порожніх вагонопотоків у припортовому залізничному вузлі. – ІКСЗТ – 2007 – №4 – с.58–63.
44. Орловський П. Н. Моделирование на ЭЦВМ процесса пропуска поездов по главному ходу железнодорожного узла // Вопросы механизации и автоматизации сортировочного процесса на железнодорожных станциях, 1975. – 160/8 – с. 107–115.
45. Устич П. А., Иванов А. А. Управление транспортом на основе математического моделирования. // Железнодорожный транспорт, 2008. – № 7. – с. 39–42
46. Мишко С. П. Модель оперативного управління вантажними потоками залізничного вузла в термінах мереж Петрі. // Економіст, 2005. – № 8. – серпень, с. 77–79
47. Лаврухін О. В., Петрушов В. В. Застосування апарату нечітких нейронних мереж для моделювання системи управління роботою залізничного вузла. // Збірник наукових праць ДонІЗТ, 2006 – №5– с.13–17
48. Долгополов П. В. Побудова моделі корпоративної мережі управління

експлуатаційною роботою залізничного вузла. // Збірник наукових праць УкрДАЗТ – Удосконалення вантажної і комерційної роботи на залізницях України – Вип. 62 – Харків, 2004

49. Резер С. М. Математическое моделирование логистической системы управления перевозками. – ВИНИТИ – Транспорт, наука, техника, управление. – М.: 2008 – №8 – с 14–18
50. Ногин В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. – М.: Физмат, 2002. – 144 с.
51. Соболь И. М., Статников Р. Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. – М.: Наука, 1981. – 210 с.
52. Поденоський В. В., Ногін В. Д. «Парето-оптимальные решения многокритериальных задач» – М.: Наука. Головна редакція фізико-математичної літератури, 1982 .– 256 с.
53. Машунин Ю. К. Методы и модели векторной оптимизации. – М.: Наука, 1986. – 141 с.
54. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений. – М.: Логос, 2000, 295 с.
55. Седых В. И., Болотов В. П., Машунин Ю. К., Сатаев А. Г. «Парето-оптимальное моделирование инженерных задач». Комп'ютерний журнал. Наукова стаття, 2004. – 22 с.
56. Левин Д. Ю. Оптимизация потоков поездов / Д. Ю. Левин – М.: Транспорт, 1998. – 175 с.
57. Дмитренко А. В. Организация поездной работы в условиях высокой грузонапряженности / А. В. Дмитренко - М.: Транспорт, 1985. – 40 с.
58. Быкадоров С. А. Управление затратами железных дорог в условиях информатизации отрасли: Дис. д-ра экон. наук : 08.00.05 : Москва, 2002.- 281 с.
59. Волков В. А. Совершенствования эксплуатации железных дорог / В. А. Волков, Д. Ю. Левин, Лерман В. Д. – М.: 1984. – С. 80-87.
60. Нагорный Е. В. Моделирование технологического процесса обработки вагонов, информации и перевозочных документов экспортно-импортного

вагонопотока по прибытию на передаточных пограничных станциях // Концепція підвищення ефективності вантажних перевезень на залізничному транспорті / Е. В. Нагорный, Т. В. Бутько, Н. Ф. Титов – Міжвуз. зб. наук. праць / ХарДАЗТ, 1998. – Вип. 33. – С. 125-129.

61. Персианов В. А. Моделирование транспортных систем / В. А. Персианов, К. Ю. Скалов, Н. С. Усков – М.: Транспорт, 1972. – 208 с.
62. Левин Д. Ю. Оптимизация перевозочного процесса на железнодорожном транспорте / Д. Ю. Левин. – М.: Транспорт, 1985. – 57 с.
63. Шпакович Р. Ідентифікація параметрів моделі руху поїзда / Р. Шпакович // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Львів, 2008. - № 616: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – С. 105-110.
64. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон - М.: «Мир». 1978. – 414 с.
65. Персианов В. А. Системотехнические расчеты транспортных сооружений на ЭВМ методом моделирования / В. А. Персианов, Н. С. Усков // Труды Союч-дорНИИ, вып. 36. Балашиха, изд. ДорНИИпроекта (ротапринт), 1968.
66. Козлов И. Т. Пропускная способность транспортних систем / И. Т. Козлов – М.: Транспорт, 1985. – 214 с.
67. Нагорный Е. В. Моделирование функционирования комплекса "Сортировочная станция – прилегающие участки" с помощью сетей Петри // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте / Е. В. Нагорный, Е. С. Алешинский – 2000. – № 2. – С. 98-103.
68. Нагорний Є. В. Економіко-математична модель функціонування логістичного ланцюга транспортного комплексу "Сортувальна станція – прилеглі дільниці" // 36. наук, праць ХарДАЗТ – Вип. 42. / Е. В. Нагорний, Е. С. Альошинський – 2000. – С. 51-57.
69. Нагорний Є. В. Економіко-математична модель функціонування логістичного ланцюга транспортного комплексу "Сортувальна станція – прилеглі дільниці" Частина 2. Методика визначення параметрів цільової функції //

Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте / Е. В. Нагорный, Е. С. Алешинский – 2000. – №6. – С. 30-42.

70. Бобровский В. И. Функциональное моделирование железнодорожных станций в тренажерах оперативно - диспетчерского персонала // Математичне моделювання / В. И. Бобровский, Р. В. Вернигора – 2004. – №6. – С. 17-21.

71. Бобровский В. И. Технико-экономическое управление железнодорожными станциями на основе эргатических моделей // Информационно - управляющие системы на железнодорожном транспорте / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора – 2000. – №6. – С. 30-42.

72. Поттгофф Г. Теория транспортных потоков / Г. Поттгофф – Берлин. На нем. яз., 618 с.

73. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.

74. Кочнев Ф. П. Организация движения на железнодорожном транспорте / Ф. П. Кочнев, В. М. Акулиничев, А. М Макарочкин. – М.: Транспорт, 1979. – 156 с.

75. Черномордик Г. И. Вес грузовых поездов и полезные длины станционных путей при электрической и тепловозной тяге. Вопросы эксплуатации железных дорог: Труды МИИТа. / Г. И. Черномордик - Вып. 86. – М.: Трансжелдориздат. – 1957. - 424 с.

76. Пейсахзон Б. Э. Вес и скорость грузовых поездов: Труды ЦНИИ МПС / Б. Э. Пейсахзон – М.: Трансжелдориздат, 1957. - Вып. 141. - 202 с.

77. Максимович Б. М. О влиянии веса поезда на простой вагонов под накоплением и в переработке. Вопросы организации вагонопотоков, графика движения и пропускной способности железных дорог: Труды МИИТа / Б. М. Максимович - Вып. 203. - М.: Транспорт. - 1965. - с.5-15.

78. Фельдман Э. Д. Унификация весовых норм и ее эффективность. Вопросы унификации весовых норм и маршрутизации грузовых перевозок: Труды ЦНИИ МПС / Э. Д. Фельдман - Вып. 186. - М.: Трансжелдориздат. - 1960. - С. 4-84.

79. Тихонов К. К. Теоретические основы выбора оптимальных весовых норм грузовых поездов / К. К. Тихонов - М.: Транспорт, 1970. - 200 с.
80. Тихонов К. К. Выбор оптимальной длины участков обращения локомотивов. Вопросы эксплуатации железных дорог: Труды МИИТа / К. К. Тихонов - Вып.168. - М.: Транспорт. – 1963. - С. 211-220.
81. Тихонов К. К. Расчет оптимальных весовых норм передаточных поездов в узлах: Метод. записка к курс. и диплом. Проектированию / К. К. Тихонов – М.: МИИТ, 1960. – С. 1-26.
82. Тихонов К. К. Выбор весовых норм грузовых поездов / К. К. Тихонов – М.: Транспорт, 1967. – 260 с.
83. Тихонов К. К. Выбор оптимальных параметров эксплуатации железных дорог / К. К.Тихонов - М.: Транспорт, 1974. – 192 с.
84. Тихонов К. К. Проблема веса и скорости грузовых поездов / К. К. Тихонов - М.: ВИНИТИ АН СССР, 1960. – 91 с.
85. Інструкція зі складання графіку руху поїздів на залізницях України. – К.: Транспорт України, 2002.
86. Каретников О. Д. График движения поездов / О. Д. Каретников, М. А. Воробьев. – М.: Транспорт, 1979. - 55с.
87. Кочнев Ф. П. Управление эксплуатационной работой железнодорожных дорог: Учеб. Пособие для вузов / Ф. П. Кочнев, И.Б. Сотников – М.: Транспорт, 1990. – 424 с.
88. Мироненко В. К. Концепція побудови логістичної системи на залізничному транспорті України / В. К. Мироненко // Удосконалення технологій перевізного процесу - Д.: ДНУЗТ. – 2004.- С. 64-66.
89. Оптимальная норма состава поезда [Электронный ресурс] / В. В. Волчанинов, В. М. Кутумов, А. С. Рящиков. З джерела: www.tvp.ru/conferen/vsppm05s/kipso259.pdf
90. Гетьман Г. К. Оценка взаимосвязи массы, длины состава и продолжительности процесса его формирования / Г. К. Гетьман // Залізн. трансп. України. - 1999. - № 2. - С. 10-12.

91. Федорец В. А. Методика определения оптимального веса поезда с учетом времени его формирования / В. А. Федорец, Д. В. Бобырь // Улучшение конструкции и обслуживания подвижного состава железных дорог : Межвуз. сб. науч. тр. / ДГТУЖТ. – Днепропетровск: "Січ", 1997. - С. 44-47.
92. Лакин И. К. Анализ основных показателей работы железнодорожного транспорта / И. К. Лакин – «Наука и транспорт», 2007. – С. 60-63.
93. Тулупов Л. П. Управление перевозками на участках и направлениях / Л. П. Тулупов // Ж.-д. трансп. – 2003. - №4. – С. 50-54.
94. Бутько Т. В. Удосконалення методології розрахунку параметрів формування составів, до складу яких входять порожні вагони / Т. В. Бутько, В. М. Чеклова, Є. В. Чеклова, О. І. Шеховцов // Залізн. трансп. України. – 2008. - № 2. – С. 23-24.
95. Логинов М. В. На основе системного подхода / М. В. Логинов, М. Н. Букин // Ж.-д. трансп. - 2004. - №7. – С. 16-20.
96. Кравчук, В. В. Повышение безопасности движения поездов повышенной массы и длины / В.В. Кравчук, И. И. Доронина, Е. А. Харин // Вісник ДНУЗТ. - Дніпропетровськ, 2007. - Вип. 14. - С. 136-141.
97. Могила В. П. Влияние веса, длины и скорости грузовых поездов на безопасность движения / В. П. Могила // Ж.-д. трансп. – 2007. – №6. – с. 49-52.
98. Мозолевич Г. Я. Дослідження характеристик поїздопотоків дніпропетровського залізничного вузла [Текст] / Г. Я. Мозолевич, Ю. В. Чибісов // Вісник Національного технічного університету «Харківського політехнічного інституту» – Вип. 9 – Вид-во Харків. техн. ун-ту «ХПІ», 2011 – с. 72–78
99. Сотников, И. Б. Эксплуатация железных дорог в примерах и задачах [Текст] / И. Б. Сотников. – М.: Транспорт, 1990. – 231 с.
100. Козаченко Д.М. Дослідження параметрів потоків поїздів на залізничних напрямках [Текст] / Д. М. Козаченко, Г. Я. Мозолевич // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, № 3/5 (45), 2010, с. 17-21.

101. Козаченко Д.М. Визначення раціональних параметрів поїздопотоків на залізничних напрямках / Д.М. Козаченко, Г.Я. Мозолевич, О.О. Мазуренко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, № 2/3 (50), 2011, с. 35-40.

102. Мозолевич Г. Я. Дослідження впливу способів формування та відправлення поїздів на показники роботи залізничних станцій та напрямків [Текст] / Г. Я. Мозолевич, О. В. Власюк // Тези 69-ї науково-технічної конференції студентів та аспірантів «Науково-технічний прогрес на залізничному транспорті» – Д.: ДІІТ. – 2009. – с. 90-91.

103. Козаченко Д. М. Дослідження організації руху поїздів на залізничному напрямку [Текст] / Д. М. Козаченко, Г. Я. Мозолевич, О. В. Власюк // Тези LXIX Міжнародної науково – практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» – Д.: ДІІТ, 2009. – с. 78-79.

104. Босов А. А. Визначення раціональних маршрутів руху поїздів на мережі доріг [Текст] / А. А. Босов, Ю. В. Чибісов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. 34 – Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. – С. 180-188.

105. Чибісов Ю. В. Імітаційна модель розподілу поїздопотоку по оптимальним маршрутам [Текст] / Ю. В. Чибісов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. 36 – Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2011. – с. 212-217.

106. Бех П. В. Прогнозування контейнерних потоків [Текст] / П. В. Бех // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – 2004. – Вип. 4. – С. 86-91.

107. Музикіна Г. І. Аналіз та перспективи розвитку контейнерних перевезень [Текст] / Г. І. Музикіна, П. В. Бех // Праці II науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем: техніка, технологія, економіка і управління». –К.: КУЕТТ. – 2004. – С. 158-159.

108. Музикіна Г. І. Постановка задачі для аналізу ефективності контейнерних перевезень [Текст] / Г. І. Музикіна, П. В. Бех,

Ю. В. Максименкова // Вісник Академії митної служби України. - 2005. - № 3 (27). - С. 78-84.

109. Юнушкин А. А. Распределение потоков в транспортных сетях (зарубежный опыт) [Текст]/ А.А. Юнушкин // Вестник транспорта. – 2007. – №12. – С. 31-34.

110. Поденоский В. В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач [Текст] / В. В. Поденоский В. Д. Ногин // – М.: Наука. Головна редакція фізико-математичної літератури, 1982 .– 256 с.

111. Кузнецов А. В. Руководство к решению задач по математическому программированию [Текст] / А. В.Кузнецов, Н. И. Холод, Л. С. Костевич // – Минск: Высшая школа, 1978 – 110 с.

112. Машунин Ю. К. Методы и модели векторной оптимизации [Текст] / Ю. К. Машунин // – М.: Наука, 1986. – 141 с.

113. Bosov A. A. Vector Optimization by Two Objective Junctions / A. A. Bosov, G. N. Kodola, L. N. Savchenko. [Електрон. ресурс]: опис. – Режим доступа: http://arxiv.org/pdf/0708.4307v1.

114. Кирсанов М. Н. Практика программирования в системе Maple / [Текст] / М. Н. Кирсанов // М.: Издательский дом МЭИ, 2011, 208 с.

115. Кирсанов М. Н.. Графы в Maple / [Текст] / М. Н. Кирсанов // М.: Физматлит, 2007, 168 с.

116. Седых В. И. Парето-оптимальное моделирование инженерных задач [Текст] / В. И. Седых, В. П. Болотов, Ю. К. Машунин, А. Г. Сатаев // Комп’ютерний журнал. Наукова стаття, 2004. – 22 с.

117. Системологія на транспорті: Підручник: У 5 кн. / За заг. ред, М. Ф. Дмитриченка. – К.: Знання України. 2005 - Кн. І: Основи теорії систем і управління / Е. В, Гаврилов. М. Ф.Дмитриченко, В. К. Доля та ін. – 344 с.

118. Орловський П. Н. Системный анализ (Основные понятия, принципы, методология) / П. Н. Орловський – Київ, 1996. – 281 с.

119. Давыдов Б. И. Подсистема информирования поездного диспетчера о потребленной энергии на тягу поездов / Информационные технологии

на ж. д. транспорте: Аннотации докладов 5-й международной науч.-техн. конференции «Инфотранс-2000» / Б. И. Давыдов, С. В. Логинов, В. В. Шаталов - 2000. – С. 28-29.

120. Зайченко Ю. П. Исследование операций: Учеб. пособие для студентов вузов / Ю. П. Зайченко – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища школа. Главное изд-во, 1979. – 392 с.

121. Деев В. В. Тяга поездов / В. В. Деев, Г. А. Ильин, Г. С. Афонин – М.: Транспорт, 1989. – 264 с.

122. Афанасьев В. Н. Математическая теория конструирования систем управления / В. Н. Афанасьев – М.: Высш. Школа, 2003. – 614 с.

123. Банди Б. Основы линейного программирования / Б. Банди – М.: Радио и связь, 1989. – 176 с.

124. Козаченко Д. М. Моделювання роботи залізничного напрямку / Д. М. Козаченко, Г. Я. Мозолевич, О. В. Власюк // Вісник ДНУЗТ. – Д.: ДІІТ, 2009. – Вип. 28. – С. 143-148.

125. Буянов В. А. Жесткий график движения поездов в среде информационных технологий организации перевозок // Вестник ВНИИЖТ / В. А. Буянов, Н. В. Кондрахина – 2001. № 4. – С. 3 – 7.

126. Некрашевич В. И. Проблема адаптации графика движения грузовых поездов к колебаниям вагонопотоков // Весник ВНИИЖТ / В. И. Некрашевич -2006. № 4. – С. 8-15.

127. Инструкция по организации поездной работы при отправлении грузовых поездов по твердым нитках графика. Утв. ЦД 19.12.2005.53 с. ВНИИАС, м. Москва.

128. Мандрикова М.Е. Затраты на грузовые перевозки по участкам железных дорог. / Под ред. М.Е. Мандрикова. — М.: Транспорт. 1991. – 222 с.

129. Математическое моделирование экономических процессов на железнодорожном транспорте / Под ред. А. Б. Каплана – М.: Транспорт. 1984. – 256 с.

130. Козлов Т. П. Курс общей теории статистики / Т. П. Козлов, В. Е. Овсиенко и др. – М.: Статистика, 1995.

131. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика / А. И. Кобзарь – М.: Физматлит, 2006. – С. 457-458.

132. Музикіна Г. І. Аналіз величини обороту вантажного вагону // Тези 68 міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» / Г. І. Музикіна, Т. В. Болвуановська – Дніпропетровськ, 2008. – С. 49-50.

133. Савенко А. С. Экономическая эффективность контейнерных перевозок на железнодорожном транспорте // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна / А. С. Савенко, Г. І. Музыкина, П. В. Бех - 2005. – Вип. 9. – С. 226-228.

134. Музикіна Г. І. Проблема управління вантажними перевезеннями в умовах впливу економічних факторів // Вісник Академії митної служби України / Г. І. Музикіна, А. С. Савенко, П. В. Бех - 2005. - № 1 (25). – С. 51-57.

135. Левицкий, И.Е. Сроки доставки грузов, план формирования поездов и материальная ответственность / И.Е. Левицкий, // Транспорт: Зб. наук. пр. №12 – Дніпропетровський державний технічний університет залізничного транспорту. – 2002. – с.102-105.

136. Інструкція з визначення станційних і міжпоїзних інтервалів. – К.: Транспорт України, 2001.

137. Інструкція з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць України. – К.: Транспорт України, 2001.

138. Державний комітет статистики. З джерела: http://www. ukrstat.gov.ua/

ДОДАТОК А
РІШЕННЯ ЗАДАЧІ РАЦІОНАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ ПОЇЗДІВ

```
> restart: with(networks): with(linalg): with(combinat,choose):
with (simplex):
```

Процедура построения простых путей. Входные параметры: z1 - начальная вершина, z2 - конечная вершина, G - граф, на котором строим все простые пути. Возвращает список простых путей - KE.

```
> Pr_way:=proc(z1,z2,G)
> local W,KW,WW,Z,s3,z,MW1,W1,zk,kw,X,Y,MX,MY,KE,q,Ke,
kol,qq,ke,k,L,L1,Kee,Kee1,e;
> W:=[]: KW:=[]:  WW:=[]:
```

задаем начальную z1 и конечную z2 вершины для построения всех простых путей между ними `W:=[op(W),[z1]]:`

```
> while W<>[] do for Z in W do
 WW:=[]:
 WW:=[op(WW),op(Z)];
 s3:=[]:
 for z in W do
   if z<>WW then s3:=[op(s3),z] end if:
 end do:
 W:=s3:
for z in WW do end do;
MW1:=neighbors(z,G);
W1:=[]:
for z in MW1 do W1:=[op(W1),z]; end do:
```

определяем в какие вершины можем попасть

```
for zk in W1 do  if zk=z2 then kw:=[]:
  kw:=[op(WW),zk];
  KW:=[op(KW),kw]:
```

пополняем конечное множество путей

```
  else
    X:=[]:
    Y:=[]:
    X:=[op(X),zk]:
    MX:={}:
    for z in X do MX:=MX union {z} end do;
    Y:=[op(Y),op(WW)]:
    MY:={}:
    for z in Y do MY:=MY union {op(z)} end do;
    if not (MX intersect MY=MX) then  W:=[op(W),[op(WW),zk]]
```

добавляем новый вариант пути `end if:`

```
 end if:
 end do:
end do;
end do;
```

Отображаем список простых путей через названия ребер

```
> KE:=[]:
for q in KW do
  Ke:=[]:
  kol:=0:
  for qq in q do kol:=kol+1: end do:
  ke:=[]:
  for k from 1 to kol-1 do
     ke:=edges({op(k,q),op(k+1,q)},G):
```

```
      Ke:=[op(Ke),op(ke)]:
  end do:
  L:=0:L1:=0:
  Kee:=convert(Ke,set):
Kee1:=convert(Ke,set):
 for e in Kee do
L:=L+op(1,eweight(op(e),G)):L1:=L1+op(2,eweight(op(e),G)): end do:
  Kee:=Kee union {L}:
Kee1:=Kee1 union {L1}:
  KE:=[op(KE),Ke]:
end do:
```

Возвращаем KE - список всех простых путей в графе G из вершины z1 в вершину z2

```
> RETURN(KE);
> end:
```

Процедура решения задачи распределения потоков по сети

Вход: N - число вершин в графе, G - граф, E - список ребер графа G, Nmax - ограничения по пропускной способности, Q-матрица потоков грузовых поездов.

Возвращает: Список ребер и распределенный поток на них; значение показателя рациональности распределения потоков.

```
> Rasp_potok:=proc(N,G,E,Nmax,u1,u2,P,Q)
> local
Nr,z,R,SS1,m,SS2,i,j,S,obg,obg1,Xr,k,XXX,s,z1,XX,e,S1,W,kol,w,w1,o
b,ob1,KL,KL1,dl,dl1,z2,z3,KE,EH,T;
```

Nr - количество ребер в графе G

```
> Nr:=0:
for z in E do Nr:=Nr+1 end do:
```

Составление ограничений по пропускной способности на ребре SS1

```
> SS1:={}:
> k:=0:for e in E do k:=k+1:S1:={}:
  for i from 1 to N-1 do
    for j from i+1 to N do
      W:=WWW[i,j];
      kol:=0:
      for w in W do kol:=kol+1:
        w1:=convert(w,set);
        if  ({e} intersect w1)={e} then  S1:=S1 union
{add(1.3*x[i,j,k]+y[i,j,k], k=kol)}  end if:
      end do:
    end do:
  end do:
  SS1:=SS1 union {add(z,z=S1)<=Nmax[k]}:
end do:
```

Составление ограничений: суммарный распределенный поток, следующий из i в j, по ребрам e(vk) должен быть равен потоку заданному SS2

```
> SS2:={}:
for i from 1 to N-1 do
  for j from i+1 to N do
    W:=WWW[i,j];
```

определяем все простые пути из i в j на графе G

```
    kol:=0:
    for w in W do kol:=kol+1: end do:
```

```
    SS2:=SS2 union
{add(x[i,j,m],m=1..kol)=evalf(P[i,j],5)}:SS2:=SS2 union
{add(y[i,j,m],m=1..kol)=evalf(Q[i,j],5)}
  od:
od:
```

Объединение ограничений SS1 и SS2

```
> S:=SS1 union SS2:
```

Функция цели obg

```
> ob:={}:ob1:={}:
for i from 1 to N-1 do
  for j from i+1 to N do
     W:=WWW[i,j];

     KL:=[]:KL1:=[]:
     kol:=0:
     for w in W do
       dl:=0:dl1:=0:
       for e in w do dl:=dl+op(1,eweight(op(e),G)):
dl1:=dl1+op(2,eweight(op(e),G)):end do:
       KL:=[op(KL),dl]: KL1:=[op(KL1),dl1]:
```

подсчитываем длины (или любой другой показатель)данных путей

```
       kol:=kol+1:
    end do:
    for m from 1 to kol do
      ob:=ob union {(x[i,j,m]+y[i,j,m])*op(m,KL)}:ob1:=ob1 union
{(x[i,j,m]+y[i,j,m])*op(m,KL1)}:
    end do:
  end do:
end do:
obg:=add(z,z=ob):obg1:=add(z,z=ob1):S:=S union {obg<=u1*t} union
{obg1<=u2*t}:
```

решение задачи, ответ в XX - множество неотрицательных решений x[i,j,m], где i - из какой вершины, j - в какую вершину, m - номер пути (для: из i в j)

```
>  Xr:=minimize(t,S,NONNEGATIVE):
XX:={}:
for z in Xr do
  if op(2,z)>=0.01 then if op(1,z)=t then T:=op(2,z) end if:XX:=XX
union {z} end if:
od:print(`Показатели рациональности распределения потоков
Pr1=`,eval(obg,Xr),`P1=u1*T`,u1*T,`Pr2=`,eval(obg1,Xr),`P2=u2*T`,u
2*T);
```

XX - возвращаем множество неотрицательных значений

```
> RETURN(XX);
> end:
```

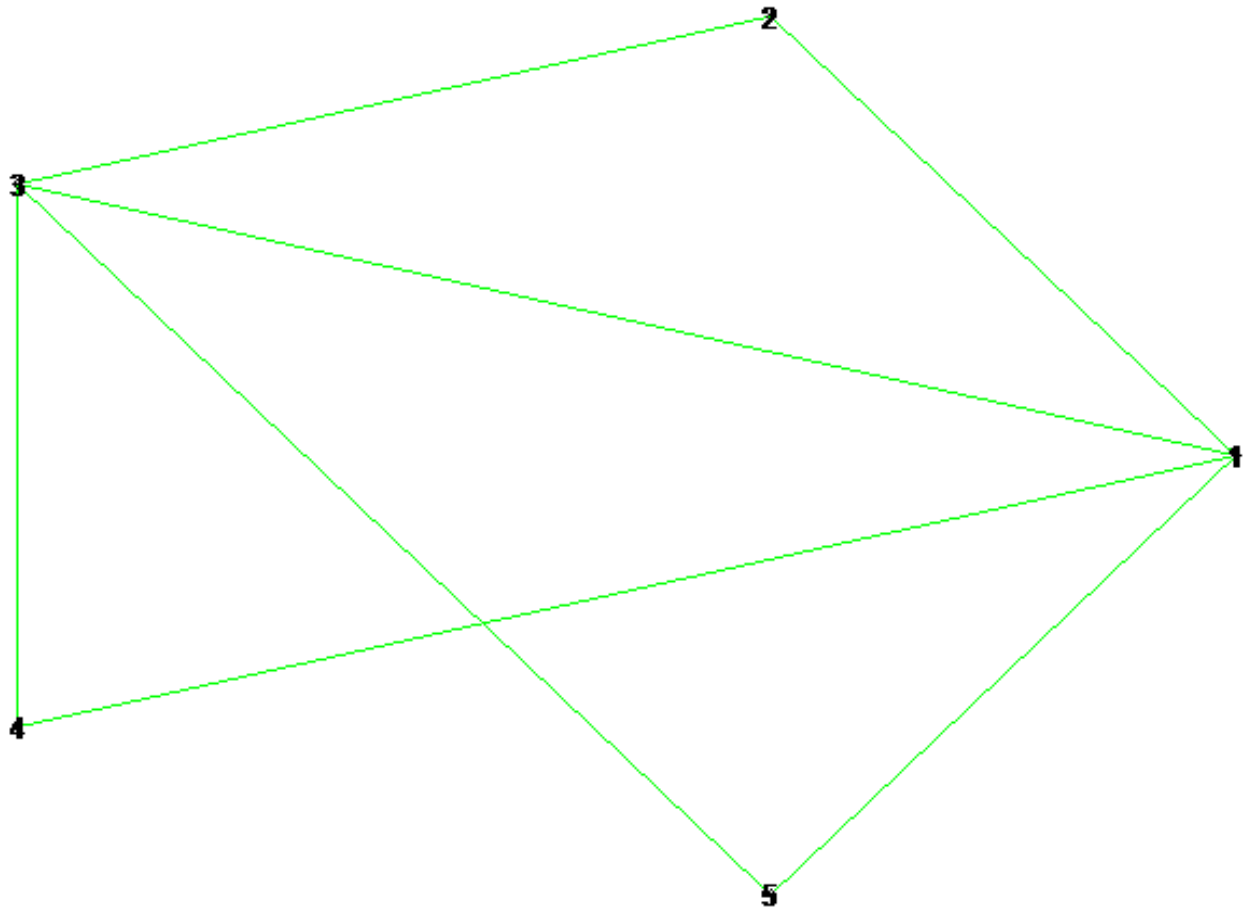
РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

рационального распределения грузовых поездов

```
> N:=5:
> new(G):
VG:=addvertex(1,2,3,4,5,G);
EG:=addedge([{1,2},{3,2},{4,3},{1,3},{3,5},{1,5},{1,4}],weights=[[
4,7],[6,4],[2,10],[5,4],[1,20],[4,3],[3,3]],G);
draw(G);
```

$$VG := 1, 2, 3, 4, 5$$

$$EG := e1, e2, e3, e4, e5, e6, e7$$



> **MSG:=adjacency(G);** Матрица смежности.

$$MSG := \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

> **Q:=matrix(N,N,[0,10,0,22,20, 10,0,9,0,13, 20,8,0,5,41, 7,16,5,0,12, 5,15,42,0,0]);** Поток грузовых поездов.

$$Q := \begin{bmatrix} 0 & 10 & 0 & 22 & 20 \\ 10 & 0 & 9 & 0 & 13 \\ 20 & 8 & 0 & 5 & 41 \\ 7 & 16 & 5 & 0 & 12 \\ 3 & 15 & 42 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Создание списка ребер графа G

```
> E:=[]:
Nmax_туда:=[120,220,220,150,121,220,1000];
Ne:=0:for z in EG do E:=[op(E),z];Ne:=Ne+1: end do:print(Ne,E);
```

```
> WWW:=array(1..N-1,2..N,[]);for i from 1 to N-1 do for j from i+1
to N do WWW[i,j]:=Pr_way(i,j,G):end do:end do:
```

$$WWW := \mathrm{array}(1..4, 2..5, [\ ])$$

> **ff:=60;** Угол между вектором U и осью Pr1.

$$ff := 60$$

```
> f:=ff*Pi/180;u1:=evalf(cos(f),5);u2:=evalf(sin(f),5);
```

$$f := \frac{1}{3}\pi$$

$$u1 := .50000$$

$$u2 := .86605$$

Распределение грузовых поездов

```
> XP:=Rasp_potok(N,G,E,Nmax_туда,u1,u2,Pp,Q);
```

$$XP := \{x_{3,5,1} = 5.720796961,\ y_{1,4,1} = 22.00000000,\ y_{4,5,1} = 11.99999999,$$
$$x_{3,5,2} = 34.27920303,\ y_{1,2,1} = 10.00000000,\ y_{2,3,1} = 9.000000000,$$
$$x_{2,5,1} = 17.00000000,\ x_{3,4,1} = 4.999999998,\ y_{3,5,1} = 41.00000000,$$
$$y_{1,5,1} = 20.00000000,\ x_{4,5,1} = 11.00000000,\ x_{1,5,1} = 21.00000000,$$
$$x_{1,4,1} = 23.00000000,\ y_{2,5,1} = 13.00000000,\ x_{2,3,1} = 8.000000000,\ t = 2434.467249,$$
$$y_{3,4,1} = 5.000000001\ \}$$

```
> WWW[2,4];
```

$$[[e1, e7], [e2, e3], [e1, e4, e3], [e2, e4, e7], [e1, e6, e5, e3], [e2, e5, e6, e7]]$$

```
> for z in XP do if op(1,z)<>t then
print(`Поездопоток`,evalf(z,3),`по
пути`,op(op(3,op(1,z)),WWW[op(1,op(1,z)),op(2,op(1,z))])) end if:
end do;
```

ДОДАТОК Б
ФРАГМЕНТ ТЕКСТУ ПРОГРАМИ РОЗРАХУНКУ РАЦІОНАЛЬНИХ МАРШРУТІВ РУХУ ПОЇЗДІВ ПО ЗАЛІЗНИЧНІЙ МЕРЕЖІ

Модуль U_ Result

```
#include <vcl.h>
#pragma hdrstop

#include "Unit3.h"
#include "Unit1.h"
#pragma package(smart_init)
#pragma resource "*.dfm"
TForm3 *Form3;
__fastcall TForm3::TForm3(TComponent* Owner)
   : TForm(Owner)
{
}
void __fastcall TForm3::Button1Click(TObject *Sender)
{
   Form3->ListBox1->Clear();
   Form3->ListBox2->Clear();
   SendMessage(Form3->ListBox1->Handle, LB_SETHORIZONTALEXTENT, 1400, 0);
   get_marshruts();
}
void __fastcall TForm3::Button2Click(TObject *Sender)
{
   if(!Form3->ListBox1->Count)
      Form3->Button1->Click();
   calc_marshruts(1);
}
void __fastcall TForm3::Button3Click(TObject *Sender)
{
   if(!Form3->ListBox1->Count)
      Form3->Button2->Click();
   build_graph();
}
#ifndef Unit3H

#define Unit3H

#include <Classes.hpp>

#include <Controls.hpp>

#include <StdCtrls.hpp>

#include <Forms.hpp>

class TForm3 : public TForm

{

__published:     // IDE-managed Components

   TGroupBox *GroupBox1;

   TButton *Button1;
```

```
    TListBox *ListBox1;
    TButton *Button2;
    TGroupBox *GroupBox2;
    TListBox *ListBox2;
    TButton *Button3;
    void __fastcall Button1Click(TObject *Sender);
    void __fastcall Button2Click(TObject *Sender);
    void __fastcall Button3Click(TObject *Sender);
private:  // User declarations
public:             // User declarations
    __fastcall TForm3(TComponent* Owner);
};
extern PACKAGE TForm3 *Form3;
#endif
```

Модуль U_ Graph

```
#include <vcl.h>
#pragma hdrstop

#include "Unit4.h"
#include <stdio.h>
#include <time.h>
#include <stdlib.h>
#pragma package(smart_init)
#pragma resource "*.dfm"
TForm4 *Form4;
__fastcall TForm4::TForm4(TComponent* Owner)
    : TForm(Owner)
{
}

void __fastcall TForm4::Button1Click(TObject *Sender)
{
    Form4->Close();
}


void __fastcall TForm4::FormPaint(TObject *Sender)
{
    int border = 40;
    int max_step = 10;

    int max_x = Form4->ClientWidth - 2*border;
    int max_y = Form4->Button1->Top - 2*border;
```

```
char s[10];
int x=0, y=0;
int pic = 50;

int x0=border, y0=max_y+border;
double xone=(float)Form4->P*0.95,
   yone=Form4->T*0.95;

TRect rect;
Form4->Canvas->Pen->Color=(TColor)0xFFFFFF;
rect.left=0;
rect.top=0;
rect.right=Form4->ClientWidth-1;
rect.bottom=Form4->Button1->Top-1;
Form4->Canvas->FillRect(rect);
Form4->Canvas->Pen->Color=(TColor)0xDDDDDD;

for(x=x0; x< max_x+border; x+=pic)
{
   Form4->Canvas->MoveTo(x,max_y + border);
   Form4->Canvas->LineTo(x,border);
   sprintf(s,"%0.0f",(xone + ((double)P*(double)x*0.1)/max_x));
   Form4->Canvas->TextOutA(x+1,y0+11,s);
}
int prir = 0;

for(y=max_y + border; y>border; y-=pic)
{
   Form4->Canvas->MoveTo(border,y);
   Form4->Canvas->LineTo(max_x+border,y);
   sprintf(s,"%0.0f",(yone + prir*((double)T*(double)pic*0.1)/max_y));
   Form4->Canvas->TextOutA(border-30,y-11,s);
   prir++;
}

int temp_font = Form4->Canvas->Font->Size;
Form4->Canvas->Pen->Color=(TColor)0x888888;
Form4->Canvas->Font->Size = 12;
Form4->Canvas->TextOutA(x0+10,border/2,"T");
Form4->Canvas->MoveTo(x0,border+1);
Form4->Canvas->LineTo(x0,y0);
Form4->Canvas->TextOutA(max_x+border+10,y0-20,"P");
Form4->Canvas->Font->Size = temp_font;
Form4->Canvas->MoveTo(x0,y0);
Form4->Canvas->LineTo(max_x+border,y0);

Form4->Canvas->Pen->Color=(TColor)0xFF0000;

srand(time(NULL));

Form4->Canvas->MoveTo(x0+max_x/2,y0-max_y/2);
x = x0+max_x/2;
y = y0-max_y/2;
```

```
    while((x>(x0+20)) && (y>(y0-max_y+20)))
    {
        Form4->Canvas->LineTo(x,y);
    }

    Form4->Canvas->MoveTo(x0+max_x/2,y0-max_y/2);
    x = x0+max_x/2;
    y = y0-max_y/2;

    while((x<(x0+max_x-20)) && (y<(y0-20)))
    {
        Form4->Canvas->LineTo(x,y);
    }
}
```

ДОДАТОК В
ТЕХНІКО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНА ХАРАКТЕРИСТИКА СТАНЦІЙ НАПРЯМКІВ

До складу двоколійного електрифікованого напрямку Д-М входить 11 роздільних пунктів (станцій і роз'їздів), у тому числі одна сортувальна станція, дві дільничні та 8 проміжних. Головною розпорядчою станцією є сортувальна станція Джанкой. Вона виконує роботу по формуванню, розформуванню поїздів на ряд напрямків. Для виконання сортувальної роботи станція обладнана сортувальною механізованою гіркою з пристроями ГАЦ.

На станції Джанкой є три послідовно розташовані парки:

а) південний парк (12 колій) по своїй спеціалізації призначений:

- для прийому пасажирських, вантажних транзитних поїздів з переробкою і без переробки і відправлення їх на всі напрямки;
- виставки сформованих поїздів із сортувального парку;
- переформування пасажирських поїздів;
- відчеплення і причеплення окремих пасажирських вагонів.

б) Північний парк (8 колій) по своїй спеціалізації призначений:

- для прийому і відправлення пасажирських поїздів;
- для пропуску вантажних поїздів;
- для пропуску локомотивів, маневрових составів і для прийому, відправлення одиночних локомотивів і господарських поїздів;
- для відстою вагонів, спеціального рухомого складу, електропоїздів, дефектоскопічних вагонів, стоянки пожежного і відбудовного поїздів.

в) Сортувальний парк (24 колії) по своїй спеціалізації призначений:

- для накопичення вагонів;
- формування і відправлення поїздів;
- підбирання місцевих вагонів.

Станція виконує роботу по пропуску транзитного потоку без переробки; по пропуску пасажирських поїздів, по переробці вагонопотоку, що надходить у розформування з усіх напрямків, по переробці місцевого вантажу.

Станція Новоолексіївка є дільничною II класу. Має дві головні колії і

п’ять приймально-відправних. Корисна довжина приймально-відправних колій коливається в межах від 548 до 987 м або від 37 до 69 умовних вагони. Під обгін вантажні поїзди приймаються в основному на 3 та 5 колії довжиною 59 та 60 ум. ваг. відповідно.

Станція Мелітополь є дільничною із основним локомотивним депо. Основним її завданням на мережі залізниць є пропуск та обслуговування транзитного пасажирського та вантажного поїздопотоку кримського напрямку. Станція має три послідовно розташованих парки – Північний, Південний та пасажирський. Північний парк призначений для обробки парного вантажного поїздопотоку із зміною поїзних локомотивів. Південний парк станції М призначений для обслуговування непарного вантажного поїздопотоку. Пасажирський парк призначений для обслуговування пасажирських поїздів кримського напрямку.

До складу двоколійного електрифікованого напрямку Ч-П входить 32 роздільних пункти (станцій і роз’їздів), у тому числі 1 сортувальна станція, 4 дільничні, 7 вантажних, 2 пасажирських та 9 проміжних.

Основною станцією переробки вагонопотоків є станція Нижньодніпровськ-Вузол. Середньодобова переробка станції складає близько 4000 вагонів. Сортувальна станція складається з двох систем: парної та непарної, обслуговує і переробляє транзитні вагонопотоки із переробкою та без переробки. Має дві сортувальні гірки: великої та середньої потужності. Сортувальні парки налічують 45 сортувальних колій.

Станція виконує роботу по пропуску транзитного потоку без переробки; по пропуску пасажирських поїздів; по переробці вагонопотоку, що надходить у розформування з усіх напрямків; по переробці місцевого вантажу.

Станції Верхівцеве, Чаплине та Синельникове-2 є дільничними І та ІІ класу. Мають окрім головних колій 13, 11 та 7 приймально-відправних відповідно. Обладнані сортувальними гірками середньої та малої потужностей. Оборотні локомотивні депо .

Станція С-2 є дільничною ІІ класу. Має 5 головних колій і 7 приймально-відправних. Обладнана сортувальною гіркою малої потужності. Станція С є дільничною ІІІ класу. Має 3 головних колії та 9 приймально-відправних. Станції

Г, Б, Н є вантажними І класу. Мають 3, 2, 4 головних та 3, 10,9 приймально-відправних колії відповідно. Станції Б та Н обладнані гірками малої потужності. Станція І є вантажною ІІ класу. Має 2 головних, 4 приймально-відправних колії загальною ємністю 231 ум. ваг. Станції Д, Вд, Вг є вантажними ІІІ класу. Мають 3, 3, 2 головних та 8, 5 , 3 приймально-відправних колії відповідно. Станція Д є позакласною пасажирською станцєю. Має 5 головних, 18 приймально- відправних колій. Обладнана гіркою малої потужності, має 6 сортувальних колій. Станція Дж-П є пасажирською ІІ класу. Має 2 головних та 1 приймально-відправну колію. Вантажна рробота на станції не виконується.

Колійний розвиток проміжних станцій використовується для обгону пасажирськими поїздами вантажних або пасажирськими – пасажирських менш швидкісних, а також на деяких станціях виконуються вантажні роботи.

ДОДАТОК Г
ФРАГМЕНТИ ФАЙЛІВ З ІНФОРМАЦІЙНИМ МАСИВОМ, ЩО ОПИСУЄ ВХІДНИЙ ПОТІК ПОЇЗДІВ ТА МОДЕЛЮВАННЯ НАПРЯМКУ СЛІДУВАННЯ ВАГОНІВ У СОСТАВІ

Джанкой1лок+ - Блокнот

Файл Правка Формат Вид Справка

```
*Поезда
3        3        33       6        600      1525     101      1011     1
3        3        33       6        480      1525     190      1011     2
3        3        33       6        1740     1525     502      1011     2
3        3        33       6        3000     1525     230      1011     2
3        3        33       6        4500     1525     252      1011     2
3        3        33       6        5700     1525     398      1011     2
3 3 33 6 86340 1525 226 1011 2
3 3 33 1 1200 1525 2001 1011 1
3 3 46 L 3501 10 11 0 3 29 16 7 3 10 11 0 3 29 16 7 3 10 11 0 3 29 16 7
3 3 33 1 1400 1525 2005 1011 5
3 3 46 L 3501 15 4 0 3 27 16 14 6 4 0 3 5 16 14 6 3 0 3 28 16 14 6 9  0
3 3 33 1 3800 1525 2007
3 3 46 L 3501 0 3 28 16 14 6 9 4 0 3 25 16 14 6 7 4 0 3 25 16 14 6 7 4
3 3 33 1 4200 1525 2009
3 3 46 L 3501 4 0 3 5 16 14 6 3 4 0 3 5 16 14 6 3 4 0 3 25 16 14 6 7 4
3 3 33 1 5800 1525 2011
3 3 46 L 3501 4 0 3 25 16 14 6 7
3 3 33 1 8200 1525 2013  1011 2
3 3 46 L 3501 15 4 0 3 5 16 14 6
3 3 33 1 9800 1525 2015
3 3 46 L 3501 14 0 13 5 6 14 6 17
3 3 33 1 14200 1525 2019
3 3 46 L 3501 16 14 6 15 4 0 3 5
3 3 33 1 15800 1525 2021
3 3 46 L 3501 14 0 13 5 6 14 6 17
```

Рис. Г.1 – Інформаційний масив, що описує вхідний потік поїздів

Моделирование разложения поездов

Файл Помощь О программе

Шифр	1	Количество поездов в расформирование	13	Пуск
Направление	0	Количество сборных поездов	2	Очистить
Вероятность назначения	0,5	Количество назначений	12	Выход
Состав поезда, ваг.	50			

Назначения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Вагоны	128	121	222	7	12	31	24	13	27	21	13	4

```
Н А З Н А Ч Е Н И Я
 1   2   3   4   5   6   7   8   9  10  11  12  :  состав
-----------------------------------------------------------
23  12   -   -   -   -   -   -   5   4   4   2  :  50
 -   -  37   -   3   3   -   2   3   2   -   -  :  50
36   -   -   6   -   -   -   8   -   -   -   -  :  50
13   -  22   -   -   -   -   -   -   -   -   1  :  36
18  17   -   -   4   -   7   -   -   -   4   -  :  50
12  15   -   -   -   -   -   2   4   4   -   -  :  37
 3  13  12   1   -   1   2   1  10   1   5   1  :  50
 6   7  29   -   2   -   2   -   2   2   -   -  :  50
```

Рис. Г.2 – Моделювання напрямку слідування вагонів

ДОДАТОК Д
ФАЙЛИ ВИХІДНИХ ДАНИХ МТП ЗАЛІЗНИЧНОГО НАПРЯМКУ

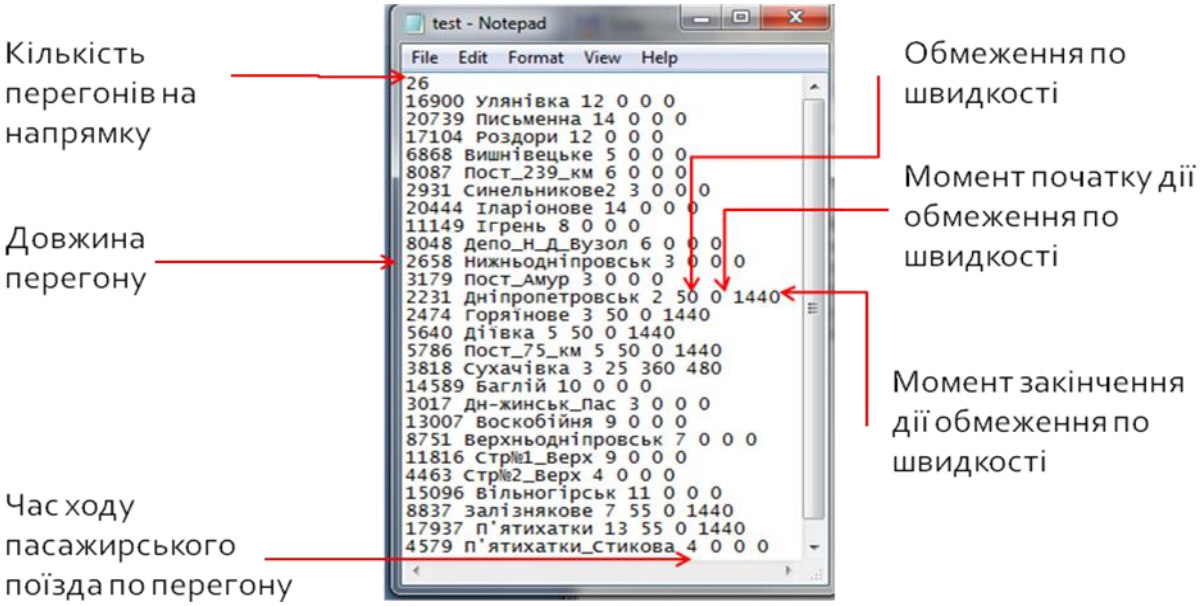


Рис. Д.1 – Фрагмент файлу вихідних даних структури залізничного напрямку

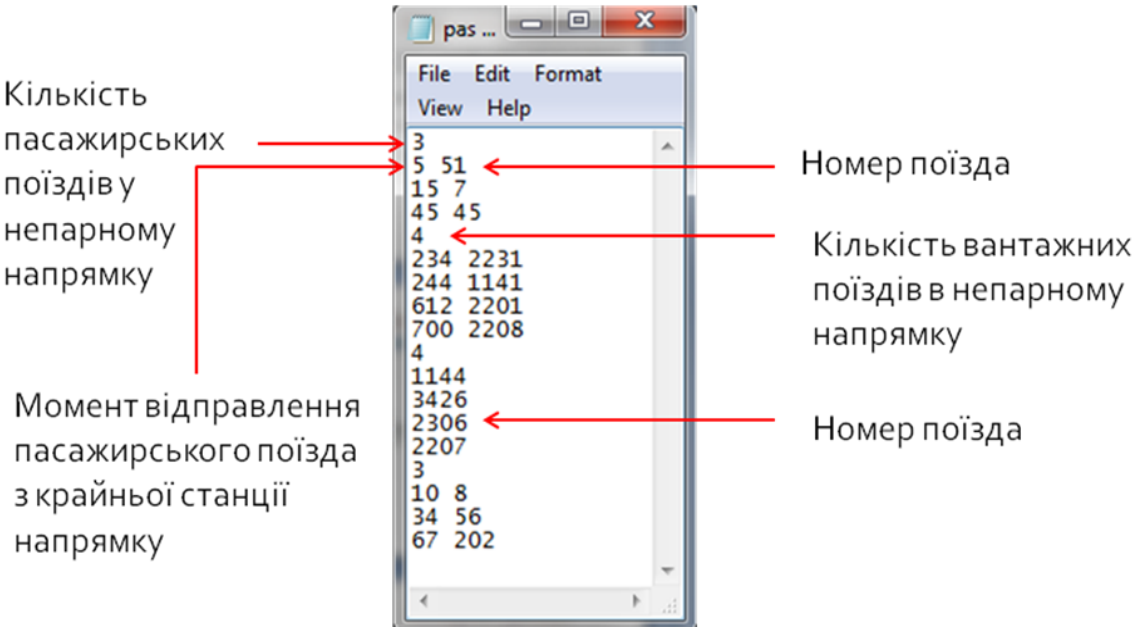


Рис. Д.2 – Фрагмент файлу вихідних даних заявок на обслуговування

ДОДАТОК Е
ФРАГМЕНТ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ОКРЕМОГО ПОЇЗДА НА НАПРЯМКУ ЗАПОРІЖЖЯ - ДЖАНКОЙ

роздільний пункт	координата	план - профіль				розрахунок руху				енергетика	
назва	поч. (м)	кінц. (м)	ухил	R кривої (м)	V макс. (км/год)	V (км/год)	шлях (м)	час (с)	стан	струм (А)	Темпе-ратура (°С)
476003, Запоріжжя-1	**178794**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**8221**	**7,58**		**14,41259**	**0**
000026, Запоріжжя-1 Вант.п.	**180355**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1561**	**2,37**		**38,8702**	**0**
462104, Кушугум	**187640**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**7285**	**8,74**		**278,003**	**0**
462053, Канкринівка	**196917**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**9277**	**7,42**		**378,6237**	**0**
461807, Плавні	**207964**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**11047**	**9,39**		**417,1651**	**0**
461900, Таврійськ	**226084**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**18120**	**15,12**		**748,6386**	**0**
461737, Бурчацьк	**236647**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**10563**	**12,45**		**743,5888**	**0**
461703, Пришиб	**246995**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**10348**	**8,78**		**475,6172**	**0**
461600, Плодородна	**257566**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**10571**	**8,29**		**242,2072**	**0**
476304, Федорівка	**268215**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**10649**	**9,28**		**328,5776**	**0**
476107, Обільна	**283503**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**15288**	**13,18**		**452,4252**	**0**
000025, Мелітополь Північний	**289755**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**6252**	**5,72**		**97,34199**	**0**
476003, Мелітополь	**290929**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1174**	**1,82**		**50,99426**	**0**
000028, Мелітополь Півд.	**291755**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**826**	**1,24**		**14,38214**	**0**
475918, Тащенак	**302811**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**11056**	**10,15**		**329,7871**	**0**
475903, Якимівка	**318332**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**15521**	**14,01**		**558,9688**	**0**
475803, Сокологірне	**344052**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**25720**	**23,80**		**1036,558**	**0**
475706, Партизани	**368418**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**24366**	**20,39**		**842,3625**	**0**
475405, Новоолексіївка	**382113**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**13695**	**11,96**		**533,7459**	**0**
475354, Салькове	**388657**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**6544**	**6,26**		**234,3879**	**0**
475301, Сиваш	**414620**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**25963**	**22,86**		**904,9448**	**0**
475212, Солоне Озеро	**424555**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**9935**	**9,60**		**447,4472**	**0**
470030, Мамут	**434253**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**9698**	**8,84**		**425,3516**	**0**
Пл. 1370 км	**442355**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**4000**	**3,54**		**156,6997**	**0**
	442355	442396	0	0	70	66,10	442355	24616,77	Хол. хід	0	61,13
	442396	442446	0	2050	70	66,35	442396	24619,00	Хол. хід	0	61,08
	442446	442474	0	2050	70	66,62	442446	24621,70	Хол. хід	0	61,05
	442474	442524	9,3	2050	70	66,75	442474	24623,21	Хол. хід	0	61,01
	442524	442535	9,3	2050	70	66,95	442524	24625,91	Хол. хід	0	61,00
	442535	442585	9,3	0	70	66,97	442535	24626,50	Хол. хід	0	60,95
	442585	442635	9,3	0	70	67,05	442585	24629,18	Тяга; Позиція: П-ОП2	954,5595	60,95
	442635	442674	9,3	0	70	67,28	442635	24631,86	Тяга; Позиція: П-ОП2	947,04122	60,95
	442674	442724	11,6	0	70	67,38	442674	24633,95	Тяга; Позиція: П-ОП2	943,99574	60,94
	442724	442774	11,6	0	70	67,43	442724	24636,62	Тяга; Позиція:	942,29736	60,94

									П-ОП2		
	442774	442824	11,6	0	70	67,37	442774	24639,29	Тяга; Позиція: П-ОП2	944,15682	60,94
	442824	442872	11,6	0	70	67,21	442824	24641,97	Тяга; Позиція: П-ОП2	949,34784	60,94
	442872	442874	11,6	4000	70	66,98	442872	24644,54	Тяга; Позиція: П-ОП2	956,78942	60,94
	442874	442887	2,8	4000	70	66,96	442874	24644,65	Тяга; Позиція: П-ОП2	957,18287	60,94
	442887	442937	2,8	0	70	66,88	442887	24645,35	Тяга; Позиція: П-ОП2	959,85861	60,94
	442937	442951	2,8	0	70	66,54	442937	24648,05	Тяга; Позиція: П-ОП2	970,8012	60,94
	442951	443001	2,8	-800	70	66,44	442951	24648,81	Тяга; Позиція: П-ОП2	973,81427	60,94
	443001	443019	2,8	-800	70	66,10	443001	24651,52	Тяга; Позиція: П-ОП2	984,82439	60,94
	443019	443069	2,8	0	70	65,96	443019	24652,50	Тяга; Позиція: П-ОП2	989,26461	60,94
	443069	443109	2,8	0	70	65,56	443069	24655,24	Тяга; Позиція: П-ОП2	1001,9616	60,94
	443109	443159	0	0	70	65,23	443109	24657,44	Тяга; Позиція: П-ОП2	1012,7586	60,95
	443159	443209	0	0	70	64,80	443159	24660,21	Тяга; Позиція: П-ОП2	1026,5107	60,95
	443209	443259	0	0	70	64,35	443209	24663,00	Тяга; Позиція: П-ОП2	1040,7846	60,96
	443259	443299	0	0	70	63,91	443259	24665,80	Тяга; Позиція: П-ОП2	1054,9417	60,97
	443299	443349	0	3000	70	63,57	443299	24668,06	Тяга; Позиція: П-ОП2	1065,7828	60,98
	443349	443355	0	3000	70	63,13	443349	24670,91	Тяга; Позиція: П-ОП2	1079,6955	60,98
	443355	443382	0,7	3000	70	63,08	443355	24671,25	Тяга; Позиція: П-ОП2	1081,2846	60,98
	443382	443432	0,7	0	70	62,86	443382	24672,79	Тяга; Позиція: П-ОП3	1120	61,00
	443432	443482	0,7	0	70	62,57	443432	24675,66	Тяга; Позиція: П-ОП3	1120	61,01
	443482	443532	0,7	0	70	62,33	443482	24678,54	Тяга; Позиція: П-ОП3	1120	61,03
	443532	443553	0,7	0	70	62,15	443532	24681,44	Тяга; Позиція: П-ОП3	1120	61,03
470007, Джанкой	**443553**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**9300**	**8,67**		**356,7775**	**0**

ДОДАТОК Є
ВИХІДНІ ФАЙЛИ ДЛЯ МОДЕЛІ ТЕХНІЧНОЇ СТАНЦІЇ

1 1 1 35 Стр #зони
1 1 2 35 Парк #прийома Пд
1 1 3 35 Сортувальний парк С
1 1 4 35 Парк #відправлення О
1 1 5 35 Стр #зони
1 3 0 60 101 - Прийом із Мамута
1 3 0 60 102 - Прийом із Отрадного
1 3 0 60 105 - Прийом із Богемки
1 3 0 60 106 - Прийом із 10-го Рз

1 2 1 20 201 - Стрілочна зона №1
1 2 1 20 202 - Стрілочна зона №2

1 2 0 20 1 - Головна 1
1 2 0 20 2 - Головна 2

1 2 2 20 50 - ПТО
1 2 2 20 55 - ПКО
1 2 2 20 70 - Сигналіст

1 2 2 20 11 5 Приймальна №5Пд
1 2 2 20 12 6 Приймальна №6Пд
1 2 2 20 13 7 Приймальна №7Пд
1 2 2 20 14 8 Приймальна №8Пд
1 2 2 20 15 9 Приймальна №9Пд
1 2 2 20 16 10 Приймальна №10Пд
1 2 2 20 17 11 Приймальна №11Пд
1 2 2 20 18 12 Приймальна №12Пд

1 2 0 20 26 - Гірка
1 2 0 20 60 - Гірочний локомотив 1

1 2 3 40 341 11 Сортувальна №11
1 2 3 40 340 12 Сортувальна №12
1 2 3 40 339 13 Сортувальна №13
1 2 3 40 338 14 Сортувальна №14
1 2 3 40 337 15 Сортувальна №15
1 2 3 40 336 16 Сортувальна №16
1 2 3 40 335 17 Сортувальна №17
1 2 3 40 334 18 Сортувальна №18

1 2 3 40 333 19 Сортувальна №21
1 2 3 40 332 20 Сортувальна №22
1 2 3 40 331 21 Сортувальна №23
1 2 3 40 330 22 Сортувальна №24
1 2 3 40 329 23 Сортувальна №25
1 2 3 40 328 24 Сортувальна №26
1 2 3 40 327 25 Сортувальна №27
1 2 3 40 326 26 Сортувальна №28

1 2 3 40 325 31 Сортувальна №31
1 2 3 40 324 32 Сортувальна №32
1 2 3 40 323 33 Сортувальна №33
1 2 3 40 322 34 Сортувальна №34
1 2 0 40 80 - Локомотив формування 1

1 2 4 20 53 - ПТО
1 2 4 20 57 - ПКО

1 2 4 20 75 - Сигналіст
1 2 4 20 150 - Автоматчик

1 2 4 20 90 35 Відправна №35
1 2 4 20 91 36 Відправна №36
1 2 4 20 92 37 Відправна №37
1 2 4 20 93 38 Відправна №38

1 2 5 20 203 - Стрілочна зона №3
1 2 5 20 204 - Стрілочна зона №4

1 2 0 60 103 - Відправлення на Мамут
1 2 0 60 104 - Відправлення на Отрадне
1 2 0 60 107 - Відправлення на Богемку
1 2 0 60 108 - Відправлення на 10-го Рз

*Поїзда

3	3	33	6	6240	1525	135	1011	1	
3	3	33	6	6780	1525	7	1011	1	
			…						
3	3	33	6	258780		1525	199	1011	1
3	3	33	6	480	1525	190	1011	2	
3	3	33	6	1740	1525	502	1011	2	
			…						
3	3	33	6	259140		1525	226	1011	2
3	3	33	1	4560	1525	2101	1011	1	
3	3	46	L	3501	0 0 0 0 3 15 12 3 3 1 0 10 13 0 0 0				
			…						
3	3	33	1	257220		1525	2408	1011	6
3	3	46	L	3501	0 0 0 0 1 14 8 4 8 0 0 0 3 0 0 0				

4 1 (get 1525)
4 3 (get 1525)
4 4 (get 1525)
4 2 лок
4 5 лок

****
Определения
****

Определение
1 Стрелочная зона 1
Определение
2 Путь приема
Определение
3 Бригада ПТО
Определение
4 Локомотив
Определение
5 Горка
Определение
6 Главный путь
Определение
7 Сигналист
Определение
8 Бригада ПКО
Определение
9 Локомотив формирования
Определение
10 Путь отправления
Определение
11 Сигналист ПО
Определение
12 Ходовой путь
Определение
13 ПТО отправления
Определение
14 Автоматчик
Определение
15 Стрелочная зона 2
Определение
16 Стрелочная зона 3
Определение
17 Стрелочная зона 4
Определение
18 ПКО отправление
Определение
19 Главный путь 2
Определение
201 Начать заезд
Определение
202 Поезд расформирован
Определение
203 Начать перестановку
Определение
204 Начать возврат в СП
****
Показатели
****
Показатель
1 Обработано поездов в парке приема -
поезд
(com 3 42 COUNTOBJ 1)
Показатель

2 Простой в парке приема -
ваг*ч
(/ (com 3 42 NAKOPL 1) 60)
Показатель
3 Средний простой вагона в парке приема -
ч
(/ (com 3 42 NORMNAKOPL 1) 60)

****
Исполнители
****

Исполнитель
201
Название
Стрелочная зона 1
Специализация
1
Исполнитель
11
Название
Путь 1
…
****
Работы
****
Работа
3
Содержание
Технический осмотр
Время
(ПТО 50 8 3 (get 1526))
onНачата
(func 4)
onЗакончена
(func 5)
Исполнитель
3 1 0
…
****
Функции
****
Функция
1 Начало приема
(com 10 0 1 (obj) (execid 1) (int (/ (TIME) 60)))
(com 10 0 1 (obj) (execid 2) (int (/ (TIME) 60)))
…
Функция
70 Начало отправления на Нижний пасс
(com 10 0 3 (obj) (execid 16) (int (/ (TIME) 60)))
(com 10 0 3 (obj) (execid 19) (int (/ (TIME) 60)))

****

Объекты
****
Объект
1 Разборка
Параметр
1525 2001 Номер поезда
Параметр
1526 65 Число вагонов
Параметр
3501 0 Разложение поезда
Параметр
1011 1 Подход из которого прибывает

ДОДАТОК Ж
РЕЗУЛЬТАТИ ПОШУКУ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ЧАСУ ХОДУ ВАНТАЖНОГО ПОЇЗДА ПО ПЕРЕГОНУ ВІД МАСИ СОСТАВУ І ДОВЖИНИ ПЕРЕГОНУ В ПРОГРАМІ *REGRESS*

1) y=b0 + b1*x1 + b2*x2;

b0=-0.8596875028 b1= 0.0001272369 b2= 0.0008707543 ;

Dост=0.69119368;

2) y=x1*x2/(b0 + b1*x1 + b2*x2);

b0=971574.4406960401 b1=1013.2639022830 b2= 0.0394602770 ;

Dост=0.80186564;

3) 57 y=b0 * x1^b1 * x2^b2;

b0= 0.0003776305 b1= 0.1380096195 b2= 0.9587952591 ;

Dост=0.86620088;

4) y=exp(b0+b1 ln(x1)+b2 ln(x2));

b0=-7.8815942749 b1= 0.1380096195 b2= 0.9587952591 ;

Dост=0.86620088;

5) y=b0 + b1*x1^0.5 + b2*x2^0.5;

b0=-9.5286114463 b1= 0.0259291289 b2= 0.1691100672;

Dост=1.34128812.

ДОДАТОК З
СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИПАДКОВОЇ ВЕЛИЧИНИ КІЛЬКОСТІ ВАГОНІВ *M* У СФОРМОВАНИХ ПОЇЗДАХ

Розподіл випадкової величини кількості вагонів *m* у сформованих поїздах *m* зміщено по осі *x* до початку координат в проміжок [0;10]. Введемо додаткову змінну:

$m_i^* = m_i - 40$

В таблиці 3.1 наведено розрахунок статистичних характеристик m_i^*.

- кількість випадків (n_m) появи відповідних значень *m*;

- статистична ймовірність P_m;

Таблиця 3.1 – Статистичний ряд числових характеристик випадкової величини *m*

m, ваг	m^*	Кількість попадань, n_m	Статистична ймовірність, P_m	$m^* P_m$	$m^{*2} P_m$
40	0	41	0,14	0,00	0,00
41	1	50	0,17	0,17	0,17
42	2	48	0,17	0,33	0,67
43	3	47	0,16	0,49	1,47
44	4	28	0,10	0,39	1,56
45	5	19	0,07	0,33	1,66
46	6	14	0,05	0,29	1,76
47	7	12	0,04	0,29	2,05
48	8	8	0,03	0,22	1,78
49	9	4	0,01	0,13	1,13
50	10	16	0,06	0,56	5,57
Разом		**287**	**1,00**	**3,21**	**17,83**

Параметри розподілу кількості вагонів у складі поїзда:

- середнє статистичне значення (оцінка математичного очікування):

$M[m^*]$= 3,21 *ваг*; $M[m]$= 43,21 ваг;

- статистична дисперсія:

$D[m^*]$ = 7,50 *ваг*^{2};

- середньоквадратичне відхилення:

$\sigma[m] = \sqrt{7{,}5} = 2{,}74$ *ваг*;

коефіцієнт варіації:

$$\nu[m^*] = \frac{2{,}74}{3{,}21} = 0{,}853.$$

ДОДАТОК І
БЛОК-СХЕМА АЛГОРИТМУ ПРОГРАМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ ТЕХНІЧНИХ СТАНЦІЙ «*ТЕМР*» ТА ФРАГМЕНТ ПРОТОКОЛУ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ МОДЕЛІ ТЕХНІЧНОЇ СТАНЦІЇ

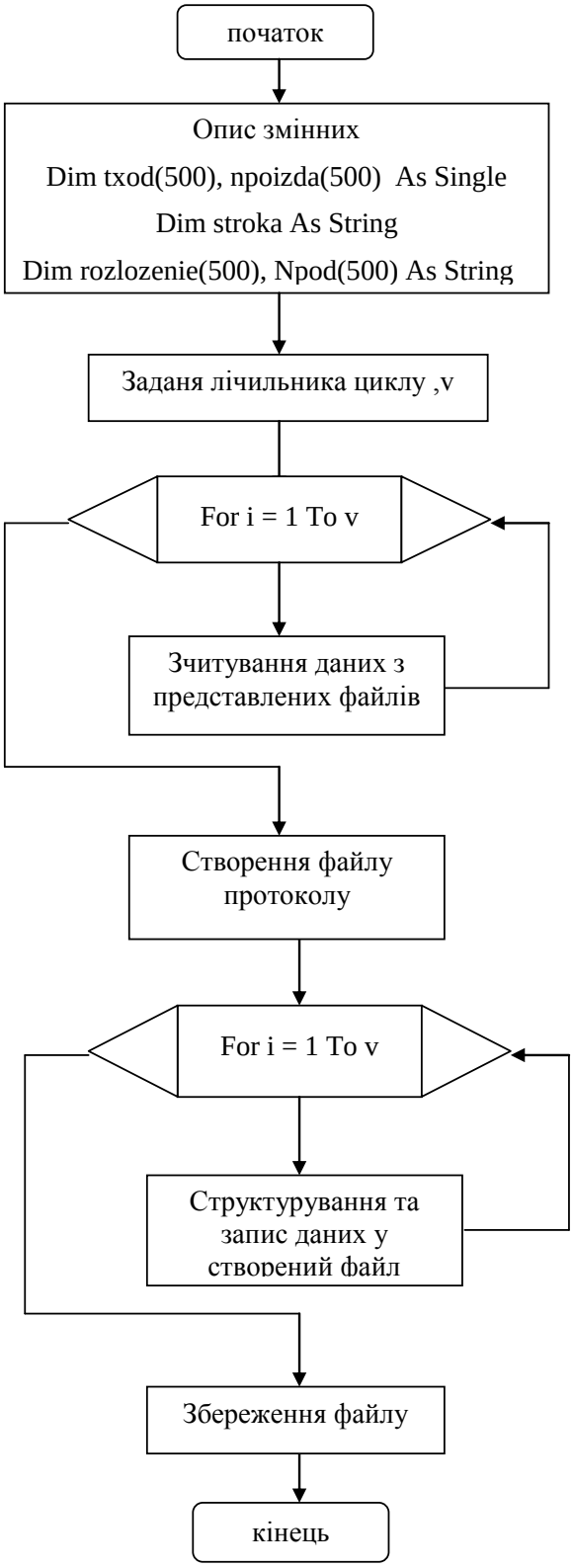


Рис. І.1 – Блок-схема алгоритму програми «temp»

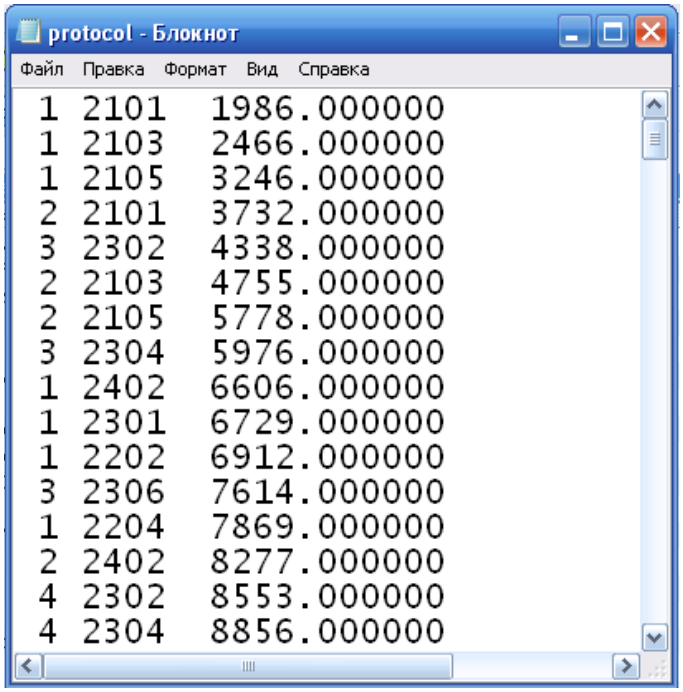


Рис. І.2 – Фрагмент протоколу результатів роботи моделі технічної станції

ЗМІСТ

ВСТУП 3
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОПУСКУ ПОЇЗДОПОТОКІВ НА ЗАЛІЗНИЧНИХ НАПРЯМКАХ 4
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАНТАЖО- ТА ПОЇЗДОПОТОКІВ У ЗАЛІЗНИЧНИХ ВУЗЛАХ ТА НА ЗАЛІЗНИЧНИХ НАПРЯМКАХ 22
2.1. Послідовність та методи проведення досліджень 23
2.2 Аналіз характеристик поїздопотоків Дніпропетровського залізничного вузла 25
2.3 Аналіз параметрів потоків поїздів на залізничних напрямках 30
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЬ раціонального розподілу ПОЇЗДОПОТОКІВ ПО ЗАЛІЗНИЧНІЙ МЕРЕЖІ 42
3.1 Постановка задачі розподілу поїздопотоків на мережі 43
3.2 Побудова математичної моделі вибору раціональних варіантів пропуску поїздопотоків 45
3.3 Розподіл поїздопотоків за напрямками 47
3.4 Побудова імітаційної моделі раціонального розподілу поїздопотоків по залізничній мережі 51
3.4.1 Побудова моделі залізничної мережі та визначення цільової функції 51
3.4.2 Визначення обмежень при розподілі поїздопотоків 53
3.4.3 Алгоритм розв’язку задачі раціонального розподілу поїздопотоків на мережі 55
3.4.4 Визначення раціонального розподілу поїздопотоків по дільницям залізничної мережі 57
РОЗДІЛ 4 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНОГО НАПРЯМКУ. 61
4.1 Загальна структура імітаційної моделі роботи залізничного напрямку 61
4.2 Моделювання вхідного потоку поїздів 64
4.3 Модель залізничного напрямку 66

4.3.1 Моделювання руху вантажних поїздів по дільниці 69
4.3.2 Порядок обслуговування об’єктів 72
4.3.3 Інформаційна модель залізничного напрямку 74
4.4 Модель технічної станції 75
4.4.1 Модель технологічного процесу роботи станції 75
4.4.2 Інформаційна модель роботи станції 77
4.5 Перевірка адекватності сполуки моделей мікро- та макрорівнів 80
4.6 Висновки 81
РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПОЇЗДІВ НА ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТАНЦІЙ ТА НАПРЯМКІВ 82
5.1 Дослідження роботи технічних станцій 82
5.1.1 Методика дослідження показників станцій 83
5.1.2 Аналітичний аналіз впливу довжини поїздів на їх простій на технічних станціях 85
5.1.3 Аналіз результатів моделювання з використанням ергатичної моделі підсистеми розформування технічної станції 91
5.1.4 Аналіз результатів моделювання, отриманих при використанні МСУ 94
5.1.5 Дослідження впливу кількості вагонів у составі поїздів на простій поїздів на технічних станціях на пасажиронапруженому напрямку 98
5.1.6 Аналіз впливу кількості вагонів у составі поїзда на експлуатаційні витрати станції 100
5.2 Дослідження роботи залізничних напрямків 103
5.2.1 Визначення впливу параметрів поїздів на тривалість знаходження на напрямку 103
5.2.2 Розрахунок показників роботи залізничного напрямку 108
5.3 Результати розрахунків експлуатаційних витрат по просуванню вагонопотоку 112
5.4 Висновки 116
РОЗДІЛ 6 ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОЇЗДОПОТОКІВ НА ЗАЛІЗНИЧНИХ НАПРЯМКАХ 118
6.1 Математична постановка задачі 118

6.2 Методика і результати досліджень 122
6.3 Висновки 130
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК 132
ДОДАТОК А Рішення задачі раціонального розподілу поїздів 145
ДОДАТОК Б Фрагмент тексту програми розрахунку раціональних маршрутів руху поїздів по залізничній мережі 150
Модуль U_ Result 150
Модуль U_ Graph 151
ДОДАТОК В Техніко-експлуатаційна характеристика станцій напрямків..... 154
ДОДАТОК Г Фрагменти файлів з інформаційним масивом, що описує вхідний потік поїздів та моделювання напрямку слідування вагонів у составі 157
ДОДАТОК Д Файли вихідних даних МТП залізничного напрямку 158
ДОДАТОК Е Фрагмент результатів моделювання руху окремого поїзда на напрямку Запоріжжя - Джанкой 159
ДОДАТОК Є Вихідні файли для моделі технічної станції 161
ДОДАТОК Ж Результати пошуку залежностей часу ходу вантажного поїзда по перегону від маси составу і довжини перегону в програмі *REGRESS* 166
ДОДАТОК З Статистичні характеристики випадкової величини кількості вагонів *m* у сформованих поїздах 167
ДОДАТОК І Блок-схема алгоритму програми автоматизованого розрахунку показників технічних станцій «*temp*» та фрагмент протоколу результатів роботи моделі технічної станції 168