

РОЗДІЛ 1.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

1.1. Коротка характеристика деяких математичних методів, що використовуються в транспортних розрахунках

Методи, що застосовуються при дослідженні транспортних процесів на даний час, можна умовно підрозділити на описові й математичні. Описові методи не дають кількісної міри для оцінки досліджуваних процесів. Тому нижче розглядаються в основному математичні методи, що одержали широке поширення в останні роки. У них насамперед потрібно відзначити існування двох напрямків: детерміністського й імовірнісного [2, 15].

У першому випадку залізничний транспорт розглядається як своєрідний механізм, а його складові частини – станції, вузли, дільниці, напрямки – як його ланки, причому зв'язок між елементами представляють у вигляді жорстких аналітичних залежностей. У другому випадку виходять із передумови, що експлуатаційні процеси носять імовірнісний, кореляційний, а не однозначно детермінований характер. Часто обидва ці підходи сполучаються у формі середньозважених величин (вага поїздів, час ходу, інтервал й т.п.) і експлуатаційних констант (коефіцієнти знімання, параметр накопичення й т.п.), значення яких устанавлюється на підставі спостережень й імовірнісних уявлень про процеси. Такий метод більш обґрунтований, тому що транспортний процес, що включає елемент випадковості, не являє собою, однак, чисто випадкового процесу; у ньому винятково висока роль «організованої» складової – графіка руху поїздів, технологічних процесів і схем. Тому формули, розроблені на підставі тільки імовірнісного або детерміністського підходу до транспортних процесів, часто не відповідають існуючій системі роботи транспорту.

З математичних методів на транспорті в цей час велике поширення одержали багато різновидів методу лінійного програмування [3, 5, 19]. У

задачах лінійного програмування умови, що накладають на область припустимих значень змінних, визначаються системою лінійних нерівностей або рівностей, при цьому шукана величина є також лінійною функцією тих же змінних.

Сутність лінійного програмування досить характеризує рішення транспортної задачі. У результаті рішення задачі виходять строго визначені й постійні оптимальні значення шуканих величин. Якщо умови перевезень змінилися, а схема прикріплення постачальників до споживачів залишилася колишньою то розрахунковий оптимум може перестати відповідати мінімуму витрат. Правда, на умови, що змінилися, можна розрахувати новий варіант прикріплення постачальників до споживачів, але перейти від одного плану перевезення до іншому часто буває досить складно. Не можна миттєво перерозподілити вантажопотоки й тим більше перенести шляхи сполучення, побудовані на першому етапі, на нові траси. У цьому змісті лінійне програмування дає оптимум даного статичного стану, а не оптимум процесу зміни або розвитку.

Вихід з положення, що створилося, із застосуванням теорії транспортної задачі лінійного програмування на реальному транспорті є подальше вдосконалення методів математичного програмування, у розробці методів цілочисельного, параметричного, стохастичного програмування й т.п.

З використанням методу цілочисельного програмування вирішуються фактично ті ж статичні задачі, у яких змінні по своєму фізичному змісті можуть приймати лише обмежене число дискретних значень і виражатися тільки в цілих числах.

Параметричне програмування використовується не стільки для відбиття динаміки процесів, скільки для врахування впливу варіації окремих параметрів задачі в деяких межах.

Одним з різновидів теорії графів є методи сіткового планування. Сіткові графіки можуть ефективно служити для управління складними

розгалуженими процесами, досить тривалими за часом. Тільки при цьому умова знаходження критичного шляху має сенс: періодичність надходження інформації про протікання процесів у системі повинна відповідати реальним можливостям управління цими процесами. За допомогою сіткових графіків можна досягти погодженості окремих операцій і процесів по тривалості й черговості, але говорити про безумовний вихід наприкінці циклу на якийсь оптимальний показник, заздалегідь розрахований, тут також не доводиться. Дія багатьох об'єктивних факторів може повести процес зовсім не так, як передбачалося, і в підсумку можна констатувати, що при відсутності графіка справи могли обстояти значно гірше.

Деякі недоліки, властиві лінійному програмуванню, усуваються застосуванням так званих комбінаторних методів. Сучасний рівень розробленості комбінаторних методів для рішення задач транспорту (планування поїздів, розміщення пристроїв у транспортних вузлах й ін.) не дає картини, що розгортається в часі, розвитку процесу або об'єкта, тому що елементи, що комбінуються, як правило, перебувають у статичному, наперед заданому стані. Комбінаторика, проте, залишається важливим інструментом рішення складних компонувальних задач, наприклад, при побудові схем вузлових пунктів мережі [15].

З методів, заснованих на теорії ймовірностей, необхідно відзначити теорію ігор і прийняття рішень, що вивчає математичні моделі, де учасники (гравці) мають різні інтереси й мають для досягнення своїх цілей більш-менш вільно обрані шляхи (стратегії). Кожний з учасників може впливати на результат, але не може його визначити. З іншого боку, результат не може бути чисто випадковим. Теорія ігор розглядає задачу вибору оптимального поведіння з урахуванням можливих дій всіх учасників і випадкових факторів. Як стратегії часто приймаються функції часу, але процеси розвитку в системах не завжди можуть бути заздалегідь задані якими-небудь функціями [19].

Кібернетика, виникнувши як «наука про управління й зв'язок у тварині й машині», необхідна для дослідження живих і подібних їм штучних систем, надалі зосередила свою увагу винятково на управлінні різними об'єктами. При рішенні різних складних комплексних задач зустрівся цілий ряд принципових утруднень, перебороти які намагається новий науковий напрямок, що стрімко розвивається – теорія систем.

Теорія систем виходить із того, що управління не можна вивчати у відриві, ізольовано від системи, якою управляють, і прагне вивчати не управління як таке, а всю сукупність процесів життєдіяльності системи, для якої управління – лише одна з важливих її сторін. У цьому зв'язку виникає ряд питань, пов'язаних із застосуванням математики, яка знаходить усе більш широке застосування не тільки в технічних, але й в економічних науках.

Якщо об'єкти вивчення природних й інженерних наук – реальності, що існують у природі, то математика має справу з «чистими» абстракціями, які можуть служити інструментом для розгляду кількісних характеристик у будь-якій області буття. Довести строго математично, наприклад, що транспортні вузли повинні розвиватися в одному чи іншому певному напрямку, неможливо, тому що розвиток транспортних вузлів не відноситься до абстрактного миру математики, а підкоряється іншим законам. Математика дає в розпорядження вчених лише відповідну абстрактну структуру, придатну для створення моделей тих або інших реальних об'єктів, визначаючи тим найвищий ступінь спільності їх розуміння. У цьому сила й слабкість математичних абстракцій: при формалізації складних наукових задач все більше число окремих властивостей реальних об'єктів, випадає з поля зору дослідника. Таким чином, кожна математична залежність є наближеним відображенням реального миру.

Інакше кажучи, математичні методи, узяті поза зв'язком з конкретними особливостями часу й станом транспорту, не можуть породити вірного уявлення про розвиток транспортної системи, охопити різні аспекти

взаємодії її елементів і процесів, дати цілеспрямовані рекомендації для практики.

Єдиним критерієм істинності теорій була й залишається практика, досвід. Кожен об'єкт дослідження має свої власні закони розвитку, зрозуміти які прагне наука. Щодо цього необхідний як нематематичний (описовий), так і математичний (формальний) підхід до вивчення матеріальних об'єктів.

Коли мовою математики записуються характеристики реальних об'єктів, а потім над цими записами (рівняннями) виробляються формальні дії за законами математики, то при цьому втрачаються конкретність відносин і зв'язків між елементами об'єкта. Нехай для якогось транспортного об'єкта (системи) знайдена деяка функція $y = F(x)$. Наприклад, пропускна здатність станції якимось чином залежить від її шляхового розвитку. Але матеріальний зміст виробничої системи – це не тільки кількість, але й певна якість. Так, пропускна здатність станції визначається не тільки кількістю шляхів, але й прийнятою схемою їх взаємного з'єднання, угруповання в парки, прийнятим порядком використання й т.п. Отже, у практичних задачах залежність

завжди трансформується в залежність виду

де M – маса, кількість матеріального змісту виробничої системи ($M = \sum x$); S – якість матеріального змісту, організації системи.

Поліпшенням організації S можна компенсувати недолік кількості M , однак просте збільшення M понад певної границі не може підвищити продуктивність системи y , якщо не буде відповідним чином поліпшена організація системи S .

Отже, на питання, чому не можна формальними перетвореннями, узятими з реальної дійсності залежностей $y = F(x)$, одержувати правдивий

результат, можна відповісти: тому, що в дійсності має місце інша залежність $y = F(M, S)$, і що зі зміною M змінюється й організація S .

При дослідженні складних систем користування залежностями виду $y = F(x)$ можливо й припустимо тільки у вузьких межах, коли зміна x не веде до зміни організації об'єкта.

1.2. Сутність системного підходу до об'єкта дослідження

Уже в XIX ст. на перший план у практиці, а, отже, і в науці стали висуватися складно організовані системні об'єкти – фізичні структури, живі організми, суспільство. У науку все більш владно вторгаються такі, майже не властиві неорганізованим об'єктам неорганічного світу поняття, як організація, саморегулювання, управління й, нарешті, розвиток.

Найвизначніші математики займалися дослідженням системних об'єктів у рамках колишнього, чисто кількісного підходу. Але потім завдяки таким вченим як Берталанфі, Гуд, Маккол та ін. розвивається такий напрямок, як теорія систем. В останні роки системний метод дослідження став проникати й у суспільні науки – філософію, історію й соціологію [15].

Говорячи про системний підхід стосовно залізничного транспорту, потрібно мати на увазі, що він не сумісний з механічними моделями в образних поданнях транспорту і його окремих процесів. Системний метод виходить із того, що транспортна мережа і її об'єкти – не машина (конвеєр або годинний механізм), але в той же час і не «чорна скриня». Вона є складним структурним утворенням, організованою сукупністю елементів.

Спроби вести дослідження й оптимізацію транспортних процесів в обхід категорії організації неминуче виливаються в екстраполяцію методів,

що зложилися на вивченні неорганізованої природи, на організовані системи, і це може не дати правильних рішень. Використання таких методів звичайно приводить лише до знаходження умовних оптимумів. Сказане не заперечує необхідності точної кількісної оцінки. Мова йде лише про неприпустимість використання методів, що не відповідають природі досліджуваних об'єктів.

Як вихідні принципи системного підходу до транспортних вузлів приймаються наступні положення:

а) розвиток транспортної системи, включаючи станції й вузли, визначається комплексом вимог економічного, соціального, політичного й оборонного характеру, що об'єктивно впливають із умов функціонування господарського організму;

б) послідовне вдосконалювання організації транспортної системи розглядається як закономірний шлях її розвитку;

в) специфічними рисами розвитку транспортної системи є виникнення нових якостей і властивостей, що не можна зводити до колишніх, розширення інформаційних функцій, диференціація (спеціалізація) і інтеграція (кооперування) її частин;

г) історичність формування мережі (кожен наступний етап впливає з попереднього, обумовлюючи органічний зв'язок минулого транспортної системи з її сьогодишнім днем), ієрархічність її структури й нелінійність властивостей є обов'язковими моментами наукового аналізу процесів розвитку.

Системний (комплексний) підхід до проблеми транспортних вузлів дає можливість ясніше бачити альтернативні рішення й шляхи підвищення ефективності розвитку транспортної мережі. У цьому полягає основний зміст комплексності і її головна методологічна цінність. Відповідно до викладених принципів транспортні комплекси повинні розглядатися як частина єдиної транспортної системи країни з виділенням загальносистемних задач, питань формування вузлових пунктів мережі й побудови (з кількісною і якісною оцінкою) їх схем.

1.3. Моделі й моделювання

Моделі й моделювання відомі ще із глибокої давності, але у своєму теперішньому виді метод моделювання оформився в результаті зближення галузей сучасного наукового пізнання. Моделі можуть виконувати найрізноманітніші функції: описові, виміру, обробки емпіричних даних, пояснювальні, передбачувальні, пізнавальні. Основне призначення системотехнічних моделей транспортних комплексів – одержання якісних характеристик об'єкта кількісними методами й виявлення «вузьких» місць [1, 15, 17].

Відмінною рисою процедури моделювання є повна відсутність яких-небудь реальних взаємодій між моделлю й оригіналом. У процесі моделювання встановлюється тільки контрольований інформаційний зв'язок об'єкта з моделлю. Наявний запас знань про оригінал переноситься на модель, випробування якої, у свою чергу, збагачує наші знання про сторони, що нас цікавлять, структуру або функції об'єкта. Модель характеризує об'єкт у деякому пізнавальному відношенні, а не об'єкт у цілому сам по собі.

Обов'язковою складовою частиною процедури моделювання на стадії вибору моделі й переносу отриманих моделюванням нових знань на оригінал є абстракція ототожнення, від рівня проведення якої залежить цінність одержуваних при моделюванні результатів. Абстракція ототожнення має верхню й нижню межі, за границями яких застосування методу моделювання губить зміст, тому що модель й оригінал як два об'єкти виходять або абсолютно тотожними, або настільки різними, що вивчення поведінки випробовуваної моделі нічого не дає для пізнання реального об'єкта.

Зупинимося коротко на суті статистичних методів моделювання, застосовуваних на залізничному транспорті, які ще називають імітаційним моделюванням. Звичайно такі методи призначаються для проведення

розрахунків на ПК по нормуванню простоїв вагонів і вантажно-розвантажувальних механізмів, а також оптимізації параметрів оригіналу. Оптимізуються число й режими роботи засобів механізації, маневрових локомотивів, місткість вантажних фронтів, прирейкових складів і станційних колій. Методики й програми для ПК, а також різного роду допущення й функціональні залежності розробляються стосовно до окремих випадків, наприклад, конкретним станціям (пасажирським, вантажним або сортувальним), причому з дуже обмеженою кількістю елементів (10-15). В основі методик лежить один з методів дослідження операцій – метод статистичних випробувань (Монте-Карло). Це емпіричний метод, характеристики окремих ланок у якому визначаються статистично [19].

Для кожного компонента процесу складається кінцева вибірка – перераховуються деякі можливі результати й кожному з них приписується певна частота появи, що відповідає відомому розподілу ймовірностей. Потім у модель системи подається повідомлення: за допомогою випадкових чисел одержують по черзі реалізацію для кожної ланки. Поводження системи в цілому реєструється як функція синтетичних даних, тобто реалізацій у кожній з ланок. Вивчаючи результати, одержують відповідь на поставлені питання.

Метод статистичних випробувань застосовується для моделювання переважно імовірнісних систем, реалізація процесу в кожній з ланок яких випадкова, хоча для взаємодіючих явищ можуть бути введені кореляційні залежності. Потрібно сказати, що це дуже трудомісткий метод, що вимагає для свого застосування й забезпечення необхідної вірогідності попереднього збору, накопичення й статистичної обробки дуже великого обсягу інформації, для деяких видів станційної інформації, наприклад за ряд років її експлуатації.

Так, для практичного застосування методу статистичних випробувань при моделюванні роботи одного з типів вантажних станцій потрібно попередньо зібрати велику кількість статистичного матеріалу, заснованого на

безпосередніх спостереженнях (хронометраж, фотографія робочого дня й т.д.), який береться з різного роду звітних документів. Далі, попереднім розрахунком визначаються численні функції розподілу параметрів системи.

Розрахунок кожної з функцій розподілу звичайно виробляється на основі об'єму вибірки в 200-500 спостережень за період, що іноді перевищує один рік, на реальному об'єкті. Потім потрібно провести роботу з уточнення параметрів системи, що моделюється, і що підлягають розрахунку; прийняти необхідні допущення.

Сказане вище відноситься до існуючих систем. Для проєктованих систем задача часто стає невизначеною, тому що можлива множина «оптимальних» рішень, що відповідають різним теоретичним законам розподілу вхідних потоків вагонів, часу їхнього обслуговування й т.д.

Залежність реалізації процесу на якій-небудь ланці реальної транспортної системи від поведінки інших ланок приводить до того, що чисто статистична модель, у яку не уведені численні кореляційні залежності, недостатньо характеризує об'єкт у пізнавальному відношенні.

Будь-яка модель не може бути просто повторенням об'єкта, але вона й не повинна відрізнятися від нього в істотних своїх властивостях. Які із властивостей об'єкта вважати істотними, і які несуттєвими, залежить від конкретної задачі, поставленої при моделюванні. Побудова моделі дає можливість проводити «комп'ютерні» експерименти, міняючи умови задачі й простежуючи вплив окремих факторів, і дозволяє тим самим перевірити висунуті гіпотези й припущення.

1.4. Сучасні умови формування потоку поїздів

Високе завантаження багатьох ліній в умовах коливань об'ємів перевезень, викликаних нерівномірністю відвантаження багатьох видів продукції, організацією запасів палива, «піком» пасажирських перевезень, ремонтно-будівельними роботами, снігопадами й т.д., привела до того, що

традиційні технологічні методи часто не забезпечують стійкість перевізного процесу. Виникаючі затруднення в експлуатаційній роботі викликають непоправні втрати навантажувальних ресурсів, пропускну здатності дільниць і станцій, погіршення використання вагонів і локомотивів, збільшення різниці між тарифними й експлуатаційними тонно-кілометровими роботами. Тому розробка інтенсивних технологій – це веління часу. Така технологія повинна передбачати роботу, як у нормальних умовах, так і при зниженні пропускну здатності через різні причини й періодичні зміни об'єму перевезень [11].

Важливий фактор інтенсифікації використання перевізних засобів – посилення планового впливу, що передбачає ув'язування системи довгострокового, середньострокового й оперативного планування перевезень, відповідність потреб у перевезенні й можливостей їх реалізації, збалансованість всіх видів ресурсів, взаємодія планів перевезення вантажів з організацією вагонопотоків і руху поїздів.

Організацію вагонопотоків регламентує план формування поїздів, що є сполучною ланкою між планом перевезень й експлуатаційною роботою залізниць й, що встановлює порядок з родом і призначенням поїздів розподіл сортувальної роботи між станціями й напрямками проходження вагонопотоків. Між потоками вантажів, вагонів, составів і поїздів існує взаємозв'язок. У теперішній час при розробці плану перевезень вантажів необхідно враховувати можливості транспорту. Інакше деякі напрямки як зазнавали рік у рік утруднення із пропуском поїздопотоків, так і будуть їх зазнавати надалі. Тому одна з найважливіших задач планування – систематичне зіставлення наявних ресурсів засобів виробництва, робочої сили, матеріалів, палива, електроенергії, транспорту й т.д. з потребою в них. Це дозволить виявити вузькі місця й усунути невідповідність у рівнях і темпах розвитку між окремими галузями.

Залізничні лінії й рух потоків поїздів на них представляють складну композицію явищ, що змінюються як у просторі, так і в часі. По довжині

дільниці змінюються елементи профілю й плану шляху, всі характеристики руху поїздів. Це викликано випадковою комбінацією профілю колії, постійними змінами кліматичних умов, впливом людини на перевізний процес, стохастичним характером поїздоутворення, тобто елементами невизначеності факторів, що впливають на формування потоків поїздів (рис. 1.1). Під впливом цих факторів міняються характеристики руху потоків поїздів: склад, швидкості руху використання пропускної здатності дільниць й ін.

Планування поїзної роботи, управління рухом поїздів, розвиток пропускної здатності залізничних ліній і вибір їх технічного оснащення пов'язані з вивченням характеру потоку поїздів. На основі дослідження руху поїздів і практики його організації вироблені численні вимірники, тому доцільно встановити єдиний комплекс характеристик. При розгляді показників руху поїздів варто виділити ті з них, які є основними. Із цією метою всі задачі, які виникають в організації руху, розділимо на два класи: 1) задачі аналізу, пов'язані з визначенням об'єму перевізної роботи (розмірів руху поїздів) і показників використання рухомого складу залежно від технічного оснащення й способу організації руху поїздів; 2) задачі синтезу, що зводяться до вибору технічного оснащення й способу організації руху виходячи із заданого об'єму поїзної роботи.

Інакше кажучи, задачі аналізу виникають при організації руху поїздів на існуючих дільницях, коли відомо їх технічне оснащення й потрібно розрахувати значення функціональних характеристик (оптимальний розмір руху поїздів, дільничну швидкість і т.д.).

Навпаки, при рішенні задач синтезу передбачаються задані значення функціональних характеристик й, насамперед розміри руху поїздів. Потрібно розрахувати таке технічне оснащення, що дозволить освоїти плановані розміри руху поїздів й одержати необхідні значення функціональних

характеристик. Причому задачі синтезу доводиться вирішувати не тільки при проектуванні нових і реконструкції існуючих ліній, але й при рішенні питань підвищення стійкості їх роботи й інтенсифікації використання пропускнуої здатності за рахунок раціонального вибору способів організації руху.

До первинних показників як у задачах аналізу, так і синтезу варто віднести показники, обумовлені потребами підприємств і населення в перевезеннях вантажів і пасажирів. На відміну від них всі інші показники є вторинними або похідними, тому що вони фактично відбивають умови руху поїздів. Тому до первинних показників відносяться сумарна інтенсивність руху пасажирських і вантажних поїздів за планований період часу й склад потоку поїздів.

Інтенсивність руху – це кількість поїздів, що проходять через перетин дільниці за одиницю часу. Як розрахунковий період часу для визначення інтенсивності руху можна приймати рік, місяць, добу, годину залежно від поставленої задачі. На мережі можна вказати ряд дільниць і напрямків, де рух поїздів досягає максимальних розмірів, у той час як на інших дільницях він значно менше. Така просторова нерівномірність відображує насамперед різну щільність залізниць на території країни й нерівномірність розміщення вантажно- і пасажироутворюючих пунктів.

Розрахунковий період звичайно рекомендується приймати рівним одній добі. Прийняття однієї доби як розрахункового періоду для всіх випадків не можна визнати обґрунтованим. Багато хто орієнтуються на добу за традицією. Дійсно, у минулому добовий період як розрахунковий, заперечень не викликав по цілком зрозумілих причинах: структура поїздопотоків була більш однорідна, будувався дільничний графік, при одній-двох парах пасажирських поїздів. Лише пізніше стало звертати на себе увагу приміський рух.

Тепер умови роботи мережі істотно змінилися. Графік на багатьох вантажонапружених лініях став структурно неоднорідним, і збереження 1440 хв як розрахункового періоду при визначенні пропускнуої здатності станцій

викликає плутанину й ускладнення формул. У пасажирському приміському русі від нього відмовилися й уже давно визначають пропускну здатність за період 1-2 години «пік». По дальньому пасажирському русі пасажирські станції також доцільно розраховувати на характерні для них один або кілька періодів згущеного прибуття й відправлення дальніх поїздів. Аналогічний підхід застосовується до внутрішньовузлових ходів, сортувальних і вантажних станцій. При цьому розрахунковий період повинен бути погоджений з організацією роботи станції, враховувати ритмічність зміни, її завантаження й визначатися на відповідний період планування.

Для тих внутрішньовузлових ходів, де приміський рух має високу питому вагу й не виділений на самостійні головні шляхи, за розрахунковий період доцільно приймати не добу, а періоди доби з характерною для кожного періоду структурою поїздопотоків. В якості цих періодів можуть бути прийняті наступні:

- 1-й – ранковий «пік» приміського руху тривалістю 2-3 год;
- 2-й – проміжок часу між ранковими й вечірнім «піками» тривалістю 6-7 год;
- 3-й – вечірній «пік» тривалістю 3-4 год;
- 4-й – проміжок між вечірнім «піком» і припиненням приміського руху тривалістю 5-6 год;
- 5-й – проміжок між припиненням і поновленням приміського руху (нічний час) тривалістю близько 5 год.

Розподіл різних категорій поїздів по періодах доби й усередині кожного періоду залежить від ритму роботи вузла.

Так, 1-й період характеризується високою питомою вагою приміського руху. Підведені за попередній (5-й) період вантажні поїзди обробляються на сортувальних станціях (розформування, накопичення, формування). Накопичуються передатні поїзди з місцевими вантажами на станції вузла. Для великих міст у цей період типово згущене прибуття дальніх пасажирських поїздів.

Особливість 2-го періоду – спад приміського руху й наростання темпу відправлення вантажних поїздів (транзитних і свого формування). На вантажних станціях прискорюються вантажно-розвантажувальні операції, а на сортувальних – поїздоутворення: спад приміського руху дозволяє дільничним диспетчерам інтенсивно підводити до вузла вантажні поїзди в переробку.

Третій період починається наростанням приміського руху й зниженням темпу відправлення вантажних поїздів. На вантажних станціях підготовлені до відправлення вагони місцевого навантаження. Дільничні диспетчери прагнуть підвести до стикових пунктів і здати на сусідні дороги й відділення найбільшу кількість вантажних поїздів.

Четвертий період – спад приміського руху й підвищення інтенсивності пропуску вантажних поїздів. У великих містах згущається відправлення дальніх пасажирських поїздів і підведення передач від вантажних станцій до сортувальних.

П'ятий, заключний, період характеризується порівняно однорідною структурою поїздопотоків. Інтенсивність вантажно-розвантажувальних операцій у вузлі знижується. Процеси сортування й формування поїздів сповільнюються, що затрудняє використання повною мірою можливості згущеного відправлення транзиту з переробкою й поїздів свого формування.

Інтенсивність руху поїздів протягом доби на одному з вантажонапружених напрямків показана на рис. 1.2. Крива фактичних розмірів руху поїздів 2 дозволяє виділити; періоди «пік», у які найбільш складно організувати й регулювати рух [12].

Рис. 1.2. Зміна інтенсивності руху поїздів протягом доби:
графікової (1) і фактичної (2)

Тимчасова нерівномірність інтенсивності руху поїздів може бути охарактеризована коефіцієнтом нерівномірності, який може бути визначений для будь-якого періоду часу (за рік, місяць, добу, годину). Коливання інтенсивності руху вантажних поїздів протягом місяця викликані зміною об'єму вантажної роботи днями тижня, наданням «вікон» для ремонтних і будівельних робіт, а також недоліками в регулюванні локомотивного парку й підвищених завдань по здачі порожніх вагонів.

Нерівномірність руху вантажних поїздів протягом року багато в чому залежить від коливань об'ємів перевезених вантажів на конкретних ділянках. Основні причини цих коливань – сезонність виробництва й споживання окремих видів продукції, зміна господарської діяльності, проведення посівних кампаній, збір урожаю й ін. Нерівномірність інтенсивності потоку поїздів для одної з ділянок характеризується коефіцієнтом нерівномірності руху. Коефіцієнт річної нерівномірності руху поїздів

де N_m – розміри руху поїздів за місяць, поїздів; N_y – сумарна інтенсивність руху за рік, поїздів; T – розрахунковий період, якщо розмір руху у місяцях, то $T = 12$ місяців (кількість місяців у році).

Коефіцієнт нерівномірності руху можна визначити, як відношення максимального об'єму перевезень за місяць до середньомісячних розмірів за рік.

Нерівномірність інтенсивності руху поїздів пояснюється багатьма причинами. До об'єктивних причин варто віднести профіль колії, розходження тягових характеристик різних серій локомотивів і т.п. Суб'єктивні причини викликані різною кваліфікацією машиністів, технічною характеристикою локомотивів однієї серії, погодними умовами й т.д. Найбільш істотними зовнішніми причинами є коливання інтервалів готовності вантажних поїздів на станціях, нерівномірність прокладки на графіці пасажирських поїздів протягом доби, «вікна» для виконання

ремонтно-шляхових робіт. Усі разом узяті причини нерівномірності інтенсивності руху визначають одну із властивостей потоку поїздів – невизначеність. Іншими основними параметрами потоку поїздів є скінченність й просторово-часовий стан. Скінченність характеризується сумірністю довжин поїздів і залізничних ліній, що проявляється при їх взаємодії, наприклад при виникненні перешкод руху й скупченні поїздів на дільницях. Швидкість руху поїздів також є скінченною величиною. Вона змінюється в кожного поїзда при проходженні різних дільниць, а також при проходженні однієї дільниці різними поїздами (рис. 1.3). Дослідження, у яких умова скінченності ігнорується, не можна вважати досить реальними. Особливо важливо це враховувати при моделюванні руху поїздів. Наприклад, роботу блок-дільниць на перегонах можна відносно легко проаналізувати, розглядаючи їх як систему масового обслуговування з послідовними каналами. Однак задача значно ускладнюється, якщо розглядаються скінченна швидкість руху й скінченна довжина поїздів.

Зміна положення поїздів при русі по дільницях є стохастичним процесом і неідентичним у просторі й у часі. Швидкості поїздів і часові інтервали між ними, зафіксовані у випадкові моменти часу, є випадковими величинами. Тому рух поїздів при регулярній детермінованій основі, обумовленої графіком руху, по своїй фізичній природі – процес імовірнісний. Також варто розрізняти часовий і просторовий процеси руху потоку поїздів.

Рис. 1.3. Розподіл ходової швидкості руху поїздів на дільниці

Вичерпною характеристикою випадкової величини є закон її розподілу. Практичне значення його полягає в тім, що закон розподілу показує, як часто зустрічається значення випадкової величини, що цікавить нас, який характер її зміни й у яких межах вона змінюється.

Для опису властивостей потоку поїздів доцільно користуватися законами розподілу: поїздів по категоріях (структура поїздопоток); просторовими й часовими інтервалами між поїздами (рис. 1.4); швидкостей руху (рис 1.3).

Рис. 1.4. Розподіл фактичного (1) і розрахункового (2) міжпоїзних інтервалів на дільниці

Закон розподілу інтервалів між поїздами містить інформацію про інтенсивність руху, чисельно рівний зворотній величині середнього міжпоїзного інтервалу. На основі закону розподілу міжпоїзних інтервалів можна знайти закон розподілу інтенсивності руху. Для цього можуть бути використані загальні методи перетворення випадкових величин. Міжпоїзні інтервали часу й швидкість руху як безперервні випадкові величини характеризуються відповідними інтегральними й диференціальними функціями розподілу, що й розуміється під терміном закон розподілу цих величин.

Просторовий розподіл інтервалів між поїздами виходить одночасним фіксуванням їх розташування на дільниці (вертикальний переріз виконаного графіка руху поїздів). Розподіл часових інтервалів між поїздами визначається в якому-небудь поперечнику (горизонтальний перетин виконаного графіка руху поїздів). Найбільший інтерес він представляє на вході й виході з дільниці й на перегоні, що лімітує. Розподіл інтервалів може бути описано законом у вигляді функції розподілу $P(I < I_0)$ (імовірність того, що міжпоїзний інтервал I як випадкова величина буде менше деякого значення I_0) або у вигляді густини ймовірностей інтервалів між поїздами $f(I)$, що визначає частку інтервалів розглянутої величини:

Як закон розподілу міжпоїзних інтервалів можуть бути обрані класичні математичні вираження, графіки яких зовні подібні з дослідною кривою (нормальний розподіл, гамма-розподіл, розподіли Пірсона, Ерланга, експонентне й т.д.), або комбінації деяких класичних розподілів із введенням дослідних коефіцієнтів або без них. Закони розподілу вибирають у результаті обробки експериментальних даних і тому застосовність їх обмежена умовами спостережуваної дільниці. Дослідні коефіцієнти одержують у результаті теоретичного аналізу й з урахуванням фізичних особливостей руху поїздів у потоці.

Для виведення аналітичного виразу, що описує густину ймовірностей міжпоїзних інтервалів, варто розкрити структуру потоку поїздів. На двоколієвних лініях при відправленні поїздів по будь-якій «нитці» графіка в процесі руху є чотири характерні групи інтервалів між поїздами:

- які обганяють (як правило, пасажирські), і, що обганяються (вантажні). Вони становлять частку p_0 від всіх інтервалів і розподіляються із густиною ймовірності $\varphi_1(I)$;
- що рухаються пакетами (у щільних групах). Ці інтервали розподілені за нормальним законом $\varphi_2(I)$ біля середнього значення I_p , що забезпечує рух на зелений сигнал світлофорів;
- після перерви в русі;
- що йдуть із середнім інтервалом.

Останні дві групи міжпоїзних інтервалів можна об'єднати [12]. Тоді аналітичне вираження для густини ймовірності міжпоїзних інтервалів прийме вид:

(1.1)

Значення A визначається з рівності:

Підставивши $I = I_p + \sigma_I x$, одержимо

функція Лапласа, її значення знаходять по таблицях у довідниках по математиці.

Третя складова – це густина розподілу потоку поїздів після перерви в русі й, що йдуть із середнім інтервалом

Інтеграл у правій частині рівності є густина ймовірності суми двох випадкових величин $I = U + t$ (t і U – частини одного міжпоїзного інтервалу). Ними враховуються поїзди, що рухаються в потоці з інтервалами, що перевищують розрахунковий. Відповідно до цього:

$$\text{де } \lambda_p = \frac{n_1}{3600} \text{ – щільність потоку поїздів на перегонах; } \lambda_c = \frac{n_2}{3600} \text{ –}$$

щільність потоку поїздів на станціях; n_1, n_2 – годинні інтенсивності рухи відповідно по головному й приймально-відправному шляхах роздільного пункту; I_p – розрахунковий міжпоїзний інтервал, якого дотримуються машиністи в щільних групах потоку, с; σ_I – середнє квадратичне відхилення розрахункових міжпоїзних інтервалів; I_0 – мінімально необхідний час заняття станційної колії для здійснення обгону поїзда, с.

Вираження (1.1) густина ймовірності, тому що воно задовольняє вимогам

Закон $f(I)$ розподілу інтервалів наведений у загальному виді.

За допомогою імовірнісних моделей, що описують рух потоку поїздів, можна вирішувати задачі по оцінці ефективності планування поїзної роботи й регулювальних заходів, використання пропускну здатності дільниць; визначенню місць установки світлофорів і довжини блок-дільниць; вибору оптимальної швидкості й режиму руху поїздів.

Особливо необхідно відзначити застосовність розподілу Пуассона. Цей розподіл дає менш точні результати, чим інші більш складні моделі. Однак по своїй простоті він перевершує всі інші розподіли, дозволяючи значно спростити аналітичний апарат. На важливість цього вказує та обставина, що дотепер всі рішення в теорії масового обслуговування отримані на основі розподілу Пуассона. Для інших розподілів поки ще немає рішення (не вважаючи окремих рішень для розподілу Ерланга). Тому можна рекомендувати розподіл Пуассона для рішення чисто практичних задач. При цьому необхідно вводити поправки, що враховують інтенсивність або вплив особливостей дільниць й організації руху поїздів. Для одержання більш точних результатів доцільно застосовувати статистичне моделювання на ПК, використовуючи закони розподілу або фактичні розподіли міжпоїзних інтервалів.

Склад потоку характеризується співвідношенням у ньому поїздів різних категорій і впливає на всі параметри руху (впливає на завантаження дільниць, що пояснюється насамперед істотною різницею у швидкості руху, вазі й довжині составів). Максимально припустима швидкість поїздів різних категорій різна, це відображується на ходовій швидкості їх руху. Крім цього, різні категорії вантажних поїздів мають різну дільничну швидкість руху.

При оптимізації руху потоку поїздів важлива не тільки різниця в статичних розмірах і вазі, але й у динамічних характеристиках, від яких залежить час заняття поїздами блок-дільниць і гальмовий шлях. Гальмовий шлях разом з характеристиками локомотива й профілем колії визначає

необхідну довжину блок-діляниць, від якої багато в чому залежить пропускна здатність ділянки.

Різний склад потоку поїздів при паралельному графіку не робить впливу на середню швидкість й інтенсивність руху. Зовсім інше положення виникає при непаралельному графіку, коли пасажирські й вантажні поїзди обертаються з різними ходовими швидкостями. Зміна співвідношення частини поїздів різних категорій уже впливає на інтенсивність руху. Урахування різної довжини й швидкості руху поїздів полегшує й уточнює застосування моделювання руху поїздів на ПК.

Просторовими характеристиками, що визначають ступінь заповнення діляниць поїздами, є щільність потоку поїздів і насичення ними діляниці. Вони показують, скільки поїздів припадає на одиницю довжини діляниці (наприклад, на 1 км). Однак насиченість діляниці поїздами необхідно відрізнити від щільності руху потоку поїздів. При визначенні останньої величини враховуються лише поїзди, що перебувають у русі або на станціях при схрещеннях, обгонах, виконанні технічних і комерційних операцій, передбачених графіком руху або технологічних умов перевізного процесу. При встановленні насиченості діляниці враховуються поїзди, що додатково залишені на станціях без локомотивів. Коли на діляниці відсутні поїзда, відставлені на станціях на тривалий час, значення насиченості й щільності рівні. Щільність разом зі швидкістю руху характеризує потік поїздів а насиченість – ще й експлуатаційні умови функціонування діляниці.

Перенасичення діляниць виникає в результаті відправлення на них більшого числа поїздів, чим передбачено графіком, побудованим на максимальні розміри руху; несвоєчасного прийому поїздів станціями; виникнення відмов технічних засобів; зайнятості вагонами або закриття прийомо-відправних шляхів на станціях; відхилення від нормативних характеристик.

Поряд з факторами, що негативно діють на виконання графіка руху, є й позитивні, насамперед резерв потужності локомотивів при проходженні з

неповновагими поїздами. Іншими можливостями зменшення впливу затримок на виконання графіка руху є скорочення часу простою составів на станціях технічного обслуговування і використання вільних «ниток» графіка для прискорення пропуску поїздів. Зміна порядку пропуску поїздів на одноколійних дільницях дозволяє скоротити число схрещень поїздів і тривалість їх стоянки на станціях у порівнянні з максимальним графіком. Вирішальне значення для скорочення затримок поїздів має оптимізація регулювання завантаженням дільниць і станцій.

1.5. Побудова моделі транспортної системи і її оцінка

Транспортну систему в найбільш загальному виді можна вважати такою, що складається з неоднорідних пристроїв (елементів) різної складності, взаємодіючих з потоком «заявок» – поїздів [15].

Від простого скупчення елементів транспортний вузол як система відрізняється тим, що його складові частини об'єднані внутрішніми зв'язками й вступають один з одним у певні відносини, що залежать від схеми вузла й технології його роботи. Схема вузла, що відображує його структуру, обмежує розмаїтість взаємодії елементів системи. Це робить задачу дослідження вузла як системи практично розв'язною.

Однією з характерних рис транспортних систем є труднощі точного прогнозування їх завантаження внаслідок складності взаємозв'язків між елементами системи, причому в дію нерідко вступають зворотні зв'язки.

Для рішення задачі необхідні вихідні дані, що характеризують порядок надходження заявок, схему їхнього проходження в системі, тривалість обслуговування окремими елементами й інші параметри. Одні параметри є фіксованими, інші ж можуть бути задані ймовірнісними функціями, з тим або іншим законом розподілу. Спосіб завдання параметрів залежить від характеру конкретно розв'язуваної задачі. Зокрема, при рішенні проектних

задач деякі параметри можуть задаватися імовірнісним способом, у той час як при рішенні поточних експлуатаційних питань параметри обслуговування регламентуються діючим графіком. У цьому випадку моменти надходження заявок у систему виявляються фіксованими.

У дослідженнях станцій і вузлів транспортні потоки звичайно розглядаються лише з кількісної сторони (розміри руху й розподіл довжин інтервалів між заявками на обслуговування). Тим часом реальний потік характеризується не тільки величиною, але й структурою, а також формами його організації, що роблять безпосередній вплив на розрахунок і спеціалізацію станційних пристроїв.

Досліджуючи великі станції (сортувальні й вантажні), різні автори висловилися за різні закони розподілу вхідного потоку, що цілком закономірно. Не існує єдиного розподілу для всіх станцій; навіть для однієї й тієї ж станції розподіл не може залишатися незмінним.

Аналітичний апарат теорії масового обслуговування найчастіше оперує так названим найпростішим потоком, у якому розподіл заявок в інтервалі часу підкоряється закону Пуассона. Такий потік іноді ще називають, трохи більш повно розкриваючи його сутність, ординарним, стаціонарним, потоком без післядії. Відсутність післядії означає, що ймовірність появи деякої події не залежить від того, чи давно така подія мала місце востаннє. Інакше кажучи, у системах з найпростішим потоком відсутні функції управління й регулювання, хоча в реальній транспортній системі цією справою зайняті тисячі людей.

Стаціонарність означає, що імовірнісний режим потоку в часі не змінюється, тобто у системі немає місця так названим перехідним процесам, коли ця одноманітність порушується.

Вимога ординарності виключає появу в розглянутий момент часу одночасно двох і більше подій (наприклад, одночасного прибуття двох поїздів з різних напрямків, у той самий парк станції).

Все більше значення в проектуванні й розвитку транспортних систем здобуває прогнозування транспортних потоків. У транспортній галузі найпоширенішою формою прогнозування є планування перевезень. Існує кілька методів планування й кожний з них має свою область застосування. Незважаючи на особливості методів, застосування кожного з них, як правило, зводиться до встановлення об'єму перевезень, які можуть бути основою для організації перевезень і планування розвитку транспортних ліній і вузлових пунктів.

Визначення транспортних вантажних потоків виробляється двома методами: балансовим і з використанням динамічних рядів.

а) *Балансовий метод* висуває підвищені вимоги до якості й об'єму вихідної інформації, що не завжди може бути забезпечено при вирішенні задач перспективного характеру.

При розрахунку вантажопотоків по кожному вантажі складається ресурсна шахматка, що, будучи накладеною на існуючу проектовану мережу шляхів сполучення, дає можливість визначити вантажообіг транспортних вузлів й одержати, таким чином, основу для планування розвитку станцій, портів і т.д.

б) *Метод динамічних рядів* вважається придатним у сфері довгострокових прогнозів і може використатися для оцінок на основі звітних даних за минулі роки. Використання динамічних рядів має під собою певну статистико-математичну основу, але дискретний характер зміни об'єму перевезень і самого процесу розвитку, буває різко порушує тенденцію попередніх років. Проте, у деяких випадках метод дає досить гарні результати. Як правило, необхідне коректування результатів урахуванням очікуваних змін показників під впливом різного роду факторів – структури перевезених вантажів, перерозподілу потоків по напрямках і т.п., що підсилюють або послабляють тенденцію, яка спостерігалася раніше.

Часто доцільним вважається зіставлення рядів натуральних показників, а не вартісних, тому що це усуває вплив таких нерегулярних факторів, як

коливання тарифів на перевезення, подорожчання будівництва й деяких інших. Істотною вимогою є дотримання логічного зв'язку при виборі рядів, що зіставляють.

Відсутність строгої функціональної залежності в показниках приводить до того, що зв'язок виявляється, як правило, кореляційним.

У прогнозуванні пасажирських перевезень застосовують наступні методи.

а) *Гравітаційний метод*. При дослідженнях гравітаційним методом виходять із того, що між двома великими населеними пунктами існує якесь транспортне «тяжіння», прямо пропорційне добутку чисельності населення цих пунктів, помноженому на коефіцієнт рухливості, і обернено пропорційно квадрату відстані між ними.

б) *Метод екстраполяції*. По минулих періодах встановлюється коефіцієнт рухливості населення, поширений на майбутнє, виходячи із припущення існування жорсткого функціонального зв'язку.

в) *Метод паралельних (динамічних) рядів*. Перевезення пасажирів за минулий період погоджуються з іншими, головним чином економічними, показниками, такими, як національний доход, продукція промисловості, сільського господарства, товарообіг. Іноді паралельні ряди, що зіставляють, включають показники використання транспортних засобів.

г) *Метод границь насичення* полягає в тім, що передбачається існування деяких нормативів потреб у пересуванні, що підлягають задоволенню, які й закладають у розрахунки.

д) *Балансовий метод*. У прогнозуванні пасажирських перевезень даний метод, на думку фахівців, не може дати задовільних результатів через відсутність досить тісного зв'язку перевезень із чисельністю населення.

Найбільша увага в дослідженнях в останні роки приділялася методу паралельних рядів. Однак, деякі фахівці вважають, що зв'язок пасажирських перевезень із національним доходом складний й невизначений. У загальних доходах населення транспортні витрати становлять порівняно невелику

величину й частку. Поїздки пасажирів відбуваються з досить різноманітними цілями й характеризуються багатьма суперечливими факторами, що досить утрудняє їхнє прогнозування навіть на порівняно недалеку перспективу.