

**ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ
(УКРАВТОДОР)**

**Державне підприємство
«Державний дорожній науково-дослідний інститут імені
М.П. Шульгіна»
(ДП «ДерждорНДІ»)**

РЕКОМЕНДОВАНО

Науковою радою Державного
агентства автомобільних доріг
України

Протокол від “___” _____ 202__ р. № ___

РЕКОМЕНДОВАНО

Науково-технічною радою
ДП «ДерждорНДІ»

Протокол від “___” _____ 202__ р. № ___

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
З МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ ПІД ЧАС ОЦІНЮВАННЯ
ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЄКТНИХ РІШЕНЬ ЩОДО ДОРОЖНЬОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ
(перша редакція)**

МР Б.2.2-37641918-928:202Х

ПОГОДЖЕНО

Директор Департаменту
розвитку доріг Укравтодору

_____ А. В. Чабанівський
“___” _____ 202__ р.

В.о. начальника Управління цифрового
та інноваційного розвитку
Укравтодору

_____ А. Б. Вознюк
“___” _____ 202__ р.

ПОГОДЖЕНО

Начальник відділу нормоконтролю
ДП «ДерждорНДІ»

_____ М. М. Стулій
“___” _____ 202__ р.

РОЗРОБЛЕНО

Директор
ДП «ДерждорНДІ»

_____ А. О. Безуглий
“___” _____ 202__ р.

Науковий керівник, завідувач відділу
обґрунтування інвестицій

_____ В. О. Іванченко
“___” _____ 202__ р.

Відповідальний виконавець, науковий
співробітник відділу обґрунтування
інвестицій

_____ Т. В. Захарова
“___” _____ 202__ р.

Київ
202__

ЗМІСТ

	С.
1 Сфера застосування	4
2 Нормативні посилання	4
3 Терміни та визначення понять	4
4 Позначки та скорочення	10
5 Будівельні норми, що обумовлюють прогнозування транспортних потоків під час проектування автомобільних доріг	10
6 Методологія побудови та роботи з транспортними моделями	11
6.1 Загальні положення	11
6.2 Загальна методологія побудови та роботи з транспортними моделями	13
6.3 Методичні основи прогнозування	14
6.4 Практична реалізація обчислень	15
6.5 Послідовність дій щодо прогнозування інтенсивності на автомобільних дорогах загального користування/вулицях	16
7 Визначення меж області моделювання	16
8 Збір вихідних даних	17
8.1 Загальні положення	17
8.1.1 Дані про транспортну мережу	17
8.1.2 Дані про дорожню мережу	18
8.2 Проектні характеристики мережі	18
8.3 Характеристика організації руху	19
8.4 Дані про систему громадського транспорту	19
8.5 Демографічні і соціально-економічні дані	20
8.6 Фактичні дані, що характеризують транспортні та пасажирські потоки	21
8.6.1 Обстеження інтенсивності руху транспортних засобів ...	21

8.6.2	Обстеження пасажиропотоків на громадському транспорті	23
8.7	Дані соціологічних опитувань	23
8.7.1	Дані про структуру переміщень	23
8.7.2	Дані про транспортну поведінку населення	24
8.8	Вимоги до точності вихідних даних	25
9	Розробка і калібрування моделі базового року	26
9.1	Загальні положення	26
9.2	Облік різних видів транспорту	26
9.3	Шари переміщень (цілі поїздки)	27
9.4	Створення графу мережі	28
9.5	Транспортне районування	29
9.6	Розрахунок транспортного попиту	30
9.6.1	Генерація переміщень населення	30
9.6.2	Генерація вантажних переміщень	31
9.7	Розрахунок матриць кореспонденцій	32
9.7.1	Розрахунок матриць затрат	32
9.7.2	Розрахунок кореспонденцій	34
9.8	Розподіл кореспонденцій за видами транспорту	35
9.9	Розрахунок кордонних кореспонденцій	36
9.10	Розподіл кореспонденцій за мережею	37
9.11	Метод ітерацій у розрахунку	38
9.12	Валідація та калібрування моделі базового року	40
9.12.1	Валідація моделі	40
9.12.2	Калібрування моделі	41
10	Розробка прогнозованої моделі	45
10.1	Необхідні дані для прогнозованої моделі	45
10.2	Визначення сценаріїв розрахунку	46
10.3	Результати моделювання транспортних потоків	46

Додаток А (довідковий) Базові поняття і підходи транспортного моделювання	47
А.1 Класифікація методів моделювання транспортних потоків ...	47
А.2 Основні принципи функціонування мікромоделей транспортних потоків	53
А.3 Основні принципи функціонування макромоделей транспортних потоків	57
Додаток Б (довідковий) Приклад анкети для придорожного опитування	62
Додаток В (довідковий) Приклад оцінювання ємності районів за обсягом відправлень	64

1 СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ

1.1 Ці методичні рекомендації встановлюють методи моделювання транспортних потоків на автомобільних дорогах загального користування.

1.2 Ці методичні рекомендації можуть бути використані органами управління дорожнім господарством, дорожньо-експлуатаційними організаціями та підприємствами, проектними і науковими організаціями.

2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

У цих методичних рекомендаціях є посилання на такі документи:

ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина I. Проектування.

Частина II. Будівництво

ДБН В.2.3-5:2018 Вулиці та дороги населених пунктів

ДБН Б.2.2-12:2019 Планування і забудова територій

ГБН В.2.3-37641918-555:2016 Автомобільні дороги. Транспортні розв'язки в одному рівні. Проектування

ДСТУ 8824:2019 Автомобільні дороги. Визначення інтенсивності руху та складу транспортного потоку.

3. ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ

Нижче подано терміни, вжиті в цих методичних рекомендаціях, та визначення позначених ними понять:

3.1 валідація моделі (validation)

Порівняння результатів моделювання і реальної ситуації з використанням набору незалежних даних, які не беруть участі в калібруванні для оцінювання працездатності моделі і можливості її використання для прогнозів

3.2 верифікація моделі (verification)

Перевірка правильності введення вихідних даних, геометрії вулично-дорожньої мережі, параметрів організації дорожнього руху, що визначають залежність (функцій) тощо

3.3 відрізок (link)

Елемент графа мережі, який представляє ділянку автомобільної дороги, лінії позавуличного транспорту, водного шляху тощо. Кожен відрізок характеризується рядом геометричних параметрів (довжина, кількість смуг та ін.) і динамічних параметрів (швидкість вільного руху, максимальна дозволена швидкість, пропускна спроможність), а також ознаками дозволу або заборони для руху транспортних засобів різних типів

3.4 вузол (node)

Елемент графа мережі, який представляє перехрестя, розв'язку, примикання/розгалуження автомобільної дороги/вулиці, станцію позавуличного транспорту тощо

3.5 калібрування моделі (calibration)

Налаштування різних параметрів моделі з метою мінімізації розбіжності даних обстежень і результатів моделювання

3.6 кордонний транспортний район (cordon traffic zone)

Умовний транспортний район, розташований на межі області моделювання.

Кордонні райони відіграють роль джерел і цілей кореспонденцій між внутрішніми районами області моделювання і територіями, що знаходяться поза нею, а також транзитних кореспонденцій через область моделювання

3.7 кореспонденція (correspondence)

Обмін, що походить від елемента i до елементу j транспортної системи в повному циклі закінченого процесу переміщення. Таким чином, кореспонденція характеризується вектором, що має координати

початкової і кінцевої точок та величину навантаження в кількості пасажирів або обсязі вантажу. У разі накладання на транспортну мережу кореспонденція отримує ще одну характеристику протяжність

3.8 корисність / функція корисності (utility function)

Функція, що оцінює ймовірність вибору способу пересування (виду транспорту) на етапі модального розподілу (розподілу за видами транспорту), а також ймовірність здійснення поїздки під час розрахунку матриць кореспонденцій (еквівалентна функції тяжіння гравітаційної моделі)

3.9 матриця кореспонденцій (trip matrix)

Матриця, елементами якої є значення кількості пересувань між кожною парою транспортних районів. Матриці кореспонденцій можна деталізувати за видами транспорту, тривалістю аналізованого інтервалу часу і метою поїздок (шарами переміщень)

3.10 мобільність (mobility)

Характеристика транспортної поведінки населення, що визначає середню кількість переміщень, що здійснюються протягом фіксованого проміжку часу з тими чи іншими цілями

3.11 модель поточного періоду

Модель конкретного об'єкта мережі, побудована в програмному комплексі, відкалібрована за реальними даними й відображає умови руху в період проведення натурних обстежень

3.12 модель формування попиту (trip generation model)

Початковий етап розрахунку моделі транспортного попиту. В якості вихідних даних використовуються дані демографічної та соціально-економічної статистики за районами. Для кожного шару попиту розраховуються сумарні обсяги відправлень і прибуття. Вони є вихідними даними для етапу розрахунку матриць кореспонденцій

3.13 рівноважний розподіл (user equilibrium assignment)

Розподіл автомобільних кореспонденцій в мережі вулиць та доріг, що задовольняє умові Вардропа: «Жоден учасник руху не може змінити свій маршрут, який дозволить зменшити узагальнену ціну свого пересування». Припущення про те, що розподіл автомобільних потоків у кожен момент часу є наближено рівноважним, лежить в основі моделювання завантаження транспортних мереж

3.14 розподіл за видами транспорту (mode choice model)

Третій етап розрахунку моделі транспортного попиту. Заснований на імовірнісних моделях дискретного вибору (Probit - або Logit - модель, модель бінарного, множинного або ранжованого вибору, «гніздова» модель тощо)

3.15 розподіл кореспонденцій (trip distribution model)

Другий етап розрахунку моделі транспортного попиту. Результатом розрахунку є матриці кореспонденцій, деталізовані за шарами попиту, але без поділу за видами транспорту

3.16 розподіл кореспонденцій за мережею (assignment model)

Четвертий, завершальний етап стандартної 4 - крокової моделі розрахунку транспортних потоків. Стандартний алгоритм розподілу кореспонденцій заснований на пошуку рівноважного розподілу. Для розподілу пасажирських кореспонденцій в системі громадського транспорту застосовуються інші алгоритми. Розподіл здійснюється відразу для декількох видів транспорту з урахуванням внеску всіх видів у загальну завантаженість вулиць і доріг

3.17 сполучення (connector)

Спеціальна дуга графа мережі, яка пов'язує умовний центр району з вузлом транспортної мережі

3.18 сценарій (scenario)

Набір модифікацій моделі базового року для розрахунку різних варіантів прогнозу інтенсивності руху в транспортній моделі

3.19 точність моделі (accuracy of the model)

Величина відхилення значень вихідних даних моделі від реальних значень цих параметрів. Визначається якістю калібрування моделі

3.20 транспортна модель (traffic model)

Комплекс математичних моделей і програмних засобів, призначений для оцінювання параметрів переміщення транспорту, пішоходів, пасажирських і вантажних потоків за транспортними і маршрутними мережами деякої території

3.21 транспортне моделювання (transport simulation)

Математичне моделювання транспортних потоків з використанням програмного забезпечення під час планування, моделювання та керування транспортними системами

3.22 транспортна пропозиція (traffic supply)

Сукупність даних про транспортну мережу. У загальному випадку включає опис всіх характеристик мережі вулиць і доріг та системи громадського пасажирського транспорту

3.23 транспортне планування (traffic planning)

Комплекс транспортних, планувальних, будівельних і природоохоронних заходів, спрямованих на забезпечення необхідних потреб у переміщеннях населення і економіки даного регіону

3.24 транспортне районування (traffic zoning)

Спосіб поєднання окремих одиниць індивідуальних потреб користувачів у переміщеннях населення і економіки даного регіону у разі використання транспортної мережі, спільно за певними параметрами (пункти відправлення або прибуття, маршрут, вид транспорту тощо) для цілей моделювання

3.25 транспортний попит (traffic demand)

Сукупність даних про послідовність рішень, прийнятих учасниками руху з приводу здійснення пересувань, виду транспорту, що використовується, і конкретного маршруту пересування, а також

кореспонденцій і транспортних потоків в мережі, що формуються в результаті цих рішень. Вираз «модель попиту» є синонімом виразу «модель прогнозу транспортних потоків»

3.26 транспортні райони (traffic zones)

Елементарні одиниці просторової структури області моделювання. Транспортні райони відіграють роль джерела і цілей всіх переміщень у транспортній системі. У графі мережі транспортні райони описуються за допомогою спеціальних вузлів — Центроїдів

3.27 функція затримки / VDF (volume-delay function) / CR-функція (capacity restraint function)

Математична функція, що характеризує залежність часу руху відрізком від його коефіцієнта завантаження. Один з найбільш популярних у практиці транспортного моделювання варіантів функції: так звана BPR функція, рекомендована Бюро доріг загального користування США (Bureau of Public Roads)

3.28 центроїд (centroid)

Спеціальний вузол графа мережі, що є модельним представленням транспортного району. Центроїди з'єднуються із вузлами мережі спеціальними дугами-зв'язками (сполученнями) та грають роль початкових і кінцевих вузлів усіх розрахункових шляхів графу

3.29 шар попиту (demand stratum)

Клас переміщень, які мають спільну мету і здійснюються учасниками руху, що характеризуються однорідністю транспортної поведінки. Для кожного шару попиту розраховується окрема матриця кореспонденцій, а також обсяги прибуття і відправлення.

4 ПОЗНАКИ ТА СКОРОЧЕННЯ

У цих методичних рекомендаціях використані наступні скорочення і позначення:

АСКДР — автоматизована система контролю за дорожнім рухом;

ВДМ — вулично-дорожня мережа;

ГІС — геоінформаційна система;

ГПТ — громадський пасажирський транспорт;

ДТП — дорожньо-транспортна пригода;

ІТС — інтелектуальна транспортна система;

ОДР — організація дорожнього руху;

СПЗ — спеціалізоване програмне забезпечення.

ТЗ — транспортні засоби;

КСОДР — комплексна схема організації дорожнього руху;

ПЗ — програмне забезпечення.

5 БУДІВЕЛЬНІ НОРМИ, ЩО ОБУМОВЛЮЮТЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ ПІД ЧАС ПРОЄКТУВАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

5.1 Підрозділ 4.7 ДБН В.2.3-5:2018 регламентує використання транспортного моделювання під час прогнозування інтенсивності руху транспорту та пішоходів на вулично-дорожній мережі міст та використання транспортного моделювання у разі вибору типу та обґрунтування рішень транспортних розв'язок в одному чи різних рівнях.

5.2 Підрозділ 10.6 ДБН Б.2.2-12:2019 передбачає використання транспортного моделювання під час обґрунтування проєктних рішень при розробленні КСОДР, а підрозділ 10.7 — під час прогнозування інтенсивності руху індивідуального транспорту, а також пасажирських пересувань та вантажних кореспонденцій.

5.3 Розділи 5 і 9 ДБН В.2.3-4 передбачають включення транспортного моделювання під час проєктування основних елементів автомобільних доріг. Але чинні нормативні документи декларують необхідність використання транспортного моделювання, але не надають конкретного порядку його застосування у проєктній документації та вимог до якості транспортних моделей.

5.2 Ці методичні рекомендації встановлюють правила розрахунку існуючої та прогнозування очікуваної на відповідний перспективний період інтенсивності руху на вулицях та дорогах загального користування під час проведення проєктно-вишукувальних робіт для врахування у проєктах з будівництва автомобільних доріг, проведенні дорожніх робіт, розробленні програм розвитку автомобільних доріг.

6 МЕТОДОЛОГІЯ ПОБУДОВИ ТА РОБОТИ З ТРАНСПОРТНИМИ МОДЕЛЯМИ

6.1 Загальні положення

6.1.1 Транспортне моделювання є найбільш точним інструментом оцінювання рішень з розвитку транспортної системи. Під час здійснення процесу транспортного моделювання передбачаються підвищені вимоги до якості вихідних даних, застосовується широкий набір альтернатив у виборі методів транспортного моделювання, надається значна кількість параметрів, що налаштовуються, і коефіцієнтів, а також показників якості функціонування. У таких умовах побудова транспортної моделі стає наукомістким і багато в чому творчим процесом. Від якості розробки та компетентності у використанні цього інструменту може залежати ефективність капіталовкладень у транспортну інфраструктуру. Все це накладає величезну відповідальність на спеціалістів з моделювання і пред'являє високі вимоги до рівня їх кваліфікації. Некваліфіковане застосування інструментів моделювання транспортних потоків не тільки

зводить нанівець всі їхні переваги, але і може призвести до прийняття недоцільних рішень, що окрім фінансових втрат дискредитує сам метод транспортного моделювання і знижує рівень довіри до нього.

6.1.2 Транспортна модель дозволяє підвищити обґрунтованість управлінських рішень на стратегічному, тактичному та оперативному рівнях управління дорожнім рухом.

6.1.3 Стратегічний рівень транспортного моделювання охоплює весь регіон моделювання з зовнішніми зв'язками. Його головне завдання — відображення та прогнозування балансу між попитом на транспортні послуги та можливостями його задоволення різними видами транспорту. Дані про економічний і соціально-економічний розвиток регіону дозволяють прогнозувати можливу зміну якості транспортного обслуговування бізнесу і населення і на цій підставі приймати стратегічні рішення про розвиток тих чи інших видів транспорту, транспортних терміналів та реалізації великих будівельних проєктів у житловій і промисловій сферах.

6.1.4 Транспортне моделювання на тактичному рівні забезпечує обґрунтоване прийняття рішень з модернізації транспортної мережі, вдосконалення ОДР, а також дозволяє виконувати оцінювання наслідків від закриття окремих ділянок автомобільної дороги для виконання ремонтних робіт, масових заходів тощо.

6.1.5 На оперативному рівні основна увага приділяється детальному аналізу пропускної спроможності окремих транспортних зв'язків і перетинів, а також впливу режимів регулювання в АСКДР та ІТС, у тому числі в режимі реального часу, коли модель включена до процесу управління рухом автомобільною дорогою.

6.1.6 Методи транспортного моделювання, що застосовуються, повинні враховувати особливості поставлених завдань, а вихідні дані повинні дозволяти оцінювати ступінь досягнення зазначених цілей. Транспортна модель, у залежності від масштабу завдань, може

охоплювати територію від цілого регіону до окремого перехрестя. Рівень деталізації та клас точності моделі повинні відповідати меті, для якої модель призначена. Залежно від необхідного ступеня деталізації опису потоків і точності одержуваних параметрів обирається відповідний клас моделі. Класифікація методів транспортного моделювання і опис базових принципів моделювання транспортних потоків надані в додатку А.

6.1.7 Застосування транспортних моделей можливе під час:

- отримання вихідних даних для вирішення завдань проекту;
- аналізування ефективності проектних рішень;
- прогнозування змін навантаження на транспортну мережу.

6.2 Загальна методологія побудови та роботи з транспортними моделями

6.2.1 Методологія в цілому включає в себе наступні кроки:

- попереднє аналізування і вибір СПЗ для транспортного моделювання;
- збір і підготовка вихідних даних для розробки моделі;
- введення отриманих вихідних даних у модель;
- верифікація моделі;
- калібрування моделі;
- валідація моделі;
- виконання експериментів, інтерпретація та аналізування результатів;
- розроблювання прогнозованої моделі (при необхідності);
- формування звітних матеріалів;
- супровід моделі, актуалізація даних (при необхідності).

Зазначена послідовність дій представлена у вигляді блок-схеми на рис. 6.1.

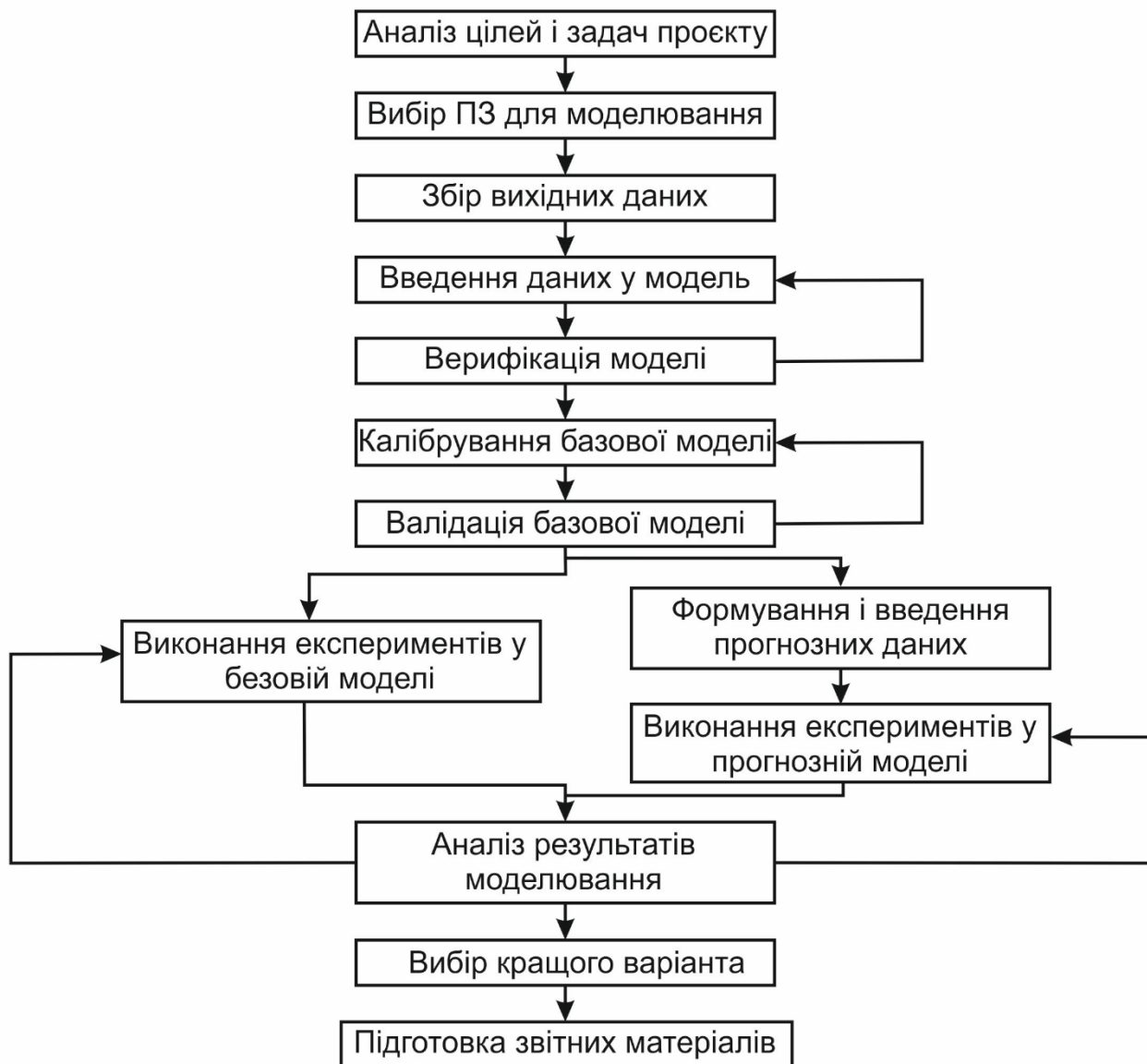


Рисунок 6.1 — Блок-схема процесу побудови моделі

6.3 Методичні основи прогнозування

Відповідно до цих методичних рекомендацій розрахунок поточної та прогнозування перспективної інтенсивності руху на автомобільних дорогах, вулицях проводиться на основі визначення ймовірної кількості транспортних засобів, що здійснюють поїздки між парами кореспондуючих населених пунктів/районів міста досліджуваної території, а також визначення ймовірних маршрутів руху для всіх поїздок.

Інтенсивність руху істотно змінюється під впливом розвитку і модернізації транспортної мережі, включаючи нове будівництво та

реконструкцію автомобільних доріг/вулиць, а також містобудівного та соціально-економічного розвитку і призводить до зміни у навколишніх територій. Цей вплив проявляється в декількох аспектах:

- загальній кількості виконаних переміщень;
- пунктах призначень і середніх відстаней переміщень;
- інтенсивності використання різних видів транспорту;
- пріоритетності шляхів пересувань.

Враховуючи потребу в коректному прогнозуванні всіх перерахованих змін необхідно використовувати комплексну математичну модель, що включає опис всіх етапів формування транспортних потоків (такі моделі називаються також моделями транспортного попиту).

Ці методичні рекомендації засновані на використанні класичної 4-крокової транспортної моделі. Зазначений підхід включає в себе наступні кроки:

- оцінювання загальних обсягів переміщень (Trip generation);
- розрахунок матриць міжрайонних кореспонденцій (Trip distribution);
- розподіл кореспонденцій за видами транспорту (Modal split);
- розподіл кореспонденцій за мережею і розрахунок інтенсивності транспортних та пасажиропотоків (Trip assignment).

6.4 Практична реалізація обчислень

Для реалізації кожного з цих кроків застосовуються математичні моделі і алгоритми, описані далі. Більшість застосовуваних алгоритмів вимагають значного обсягу обчислень, практичне виконання яких (крім окремих гранично спрощених випадків) можливе тільки із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення, створеного для цілей прогнозу транспортних потоків (розробки моделей попиту).

У рамках 4-крокової транспортної моделі застосовується велика кількість конкретних алгоритмів, які використовуються для моделювання різних етапів процесу формування транспортних потоків. У 10.5 — 10.9

цих методичних рекомендацій сформульовані вимоги до застосовуваних алгоритмів і наведені типові алгоритми, найбільш поширені в світовій практиці. Окрім наведених типових алгоритмів допускається застосування інших математичних алгоритмів, запропонованих розробниками спеціалізованого програмного забезпечення для транспортного моделювання і опублікованих у науковій літературі, за умови дотримання положень цих методичних рекомендацій.

6.5 Послідовність дій щодо прогнозування інтенсивності на автомобільних дорогах загального користування/вулицях

Для прогнозування інтенсивності руху на автомобільних дорогах/вулицях рекомендується наступна послідовність дій:

1. Визначення області моделювання.
2. Збір вихідних даних необхідних для побудови моделі, включаючи проведення натурних обстежень і соціологічних опитувань.
3. Розроблення та калібрування транспортної моделі поточного року за даними обстежень.
4. Розроблення моделей на перспективу і прогнозування інтенсивності руху на автомобільних дорогах/вулицях.

7 ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ ОБЛАСТІ ТРАНСПОРТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Для прогнозування інтенсивності транспортних потоків на автомобільній дорозі/ділянці загального користування/вулиці, які проєктуються, необхідно моделювати переміщення в межах області її тяжіння. В область моделювання потрібно включати:

- альтернативні дороги, тобто дороги/вулиці, що йдуть у близькому напрямку і надають альтернативні маршрути руху щодо проєктної дороги (ділянки) чи вулиці;

— всі території, кореспонденції з яких ймовірно будуть використовувати проектну дорогу/вулицю чи їх ділянку, або користуватися запропонованими альтернативними шляхами.

Область моделювання визначається наступним чином: вибираються дві найближчі великі магістралі справа і зліва від проектної дороги/вулиці, потім в область моделювання включаються всі адміністративні райони/території ОТГ, що лежать всередині альтернативних доріг/вулиць, а також прилеглі до альтернативних доріг/вулиць із зовнішнього боку.

8 ЗБІР ВИХІДНИХ ДАНИХ

8.1 Загальні положення

Метою етапу збору даних є підготовка повного набору якісних вихідних даних, необхідних для побудови моделі. Якість і точність вихідних даних відіграє вирішальну роль у достовірності результатів моделювання.

Для визначеної згідно з розділом 7 області транспортного моделювання необхідно зібрати наступні види інформації:

- дані про транспортну мережу;
- демографічні та соціально-економічні дані про транспортну рухомість/мобільність населення;
- об'єм вантажних перевезень у межах області аналізування;
- фактичні дані за транспортними і пасажирськими потоками, що необхідні для калібрування моделі базового року;
- дані соціологічних опитувань.

8.1.1 Дані про транспортну мережу

Транспортна мережа в загальному випадку включає в себе дані про:

- дорожню мережу, в т. ч. автомобільні дороги міжнародні, національні, регіональні, територіальні, місцевого значення та вулично-дорожню мережу міст;

- систему громадського пасажирського транспорту.

Вулично-дорожня мережа міст може включатися в модель, якщо розглянута проєктна дорога/вулиця проходить крізь або поблизу великих міст. Необхідність опису системи пасажирського транспорту, як альтернативи використання проєктної дороги, виникає у разі моделювання переміщень поблизу великих міст, коли щоденні міські переміщення формують значну частку завантаженості проєктної дороги.

8.1.2 Дані про дорожню мережу

У ході виконання робіт необхідно зібрати наступну інформацію:

Геометричні характеристики мережі, в тому числі:

- кількість смуг у кожному напрямку (з урахуванням фактичного використання);

- смуги розгону/гальмування;

- ширина смуг;

- параметри тротуарів і велосипедних доріжок;

- конфігурації перетинів (у т. ч. пішохідних переходів і перетинів з велодоріжками).

Інформація про геометричні параметри мережі може бути імпортована в програму транспортного моделювання з наявних ГІС або вводиться з допомогою графічного редактора, що надається програмою транспортного моделювання. У разі імпорту даних з ГІС, геометричні характеристики мережі обов'язково необхідно перевіряти їх відповідності фактичним даним за допомогою супутникової або аерофотозйомки, а також шляхом безпосередніх обстежень.

8.2 Проєктні характеристики мережі

Проєктні характеристики мережі:

- швидкість руху при вільному потоці;

- пропускна здатність;
- наявність виділених смуг (для окремих видів транспорту);
- дозволеність або заборона руху окремих видів транспортних засобів;
- категорія вулиці чи дороги;
- локальні обмеження швидкості;
- наявність або заборона паркування вздовж проїзної частини;
- інші параметри, які можуть впливати на фактичну швидкість руху при різного ступеня завантаженості.

8.3 Характеристика організації руху

Організація руху на перехрестях, транспортних розв'язках, у тому числі:

- наявність заборон окремих маневрів;
- розподіл напрямків руху за смугами;
- режими світлофорного регулювання (число фаз, порядок їх чергування, тривалість циклу, тривалість основних і проміжних тактів).

Для врахування затримок на перехрестях аналізується кожен напрямок руху. Час затримки під час проїзду перехрестя може бути задано функцією або розраховуватися аналітично за наявними в СПЗ методиками. Не рекомендується використовувати фіксовані значення часу проїзду перехресть, які не залежать від величини їх завантаження.

Вище зазначені характеристики рекомендується приймати згідно чинних нормативних документів, які регламентують вимоги до проектування та будівництва вулиць та доріг.

8.4 Дані про систему громадського транспорту

Склад необхідних даних про систему ГПТ може відрізнятися в залежності від обраної методики врахування ГПТ у моделі згідно 10.6 і включає в себе наступні дані:

- дані про мережу позавуличного (рейкового) транспорту;
- трасування маршрутів ГПТ;

- місця розташування зупинок маршрутного та громадського транспорту;
- інтервал та/або розклад руху;
- тип і характеристики рухомого складу;
- середні швидкості руху на різних ділянках маршрутів (за відсутності детальної інформації допускається використовувати наближені значення за різними ділянками в межах області моделювання).

8.5 Демографічні і соціально-економічні дані

Оскільки переміщення завжди відбуваються до конкретних об'єктів відвідування, необхідно зібрати інформацію про розміщення різних об'єктів на території в межах області моделювання.

Склад необхідних даних:

- розміщення місць проживання населення;
- розміщення робочих місць;
- розміщення об'єктів культурно-побутового та адміністративного призначення (об'єкти торгівлі, медичного обслуговування, навчальні заклади тощо);
- розміщення об'єктів, які генерують вантажні перевезення.

В якості оцінювання наповненості районів об'єктами різних типів можуть бути використані дані щодо кількості працівників, зайнятих у тих чи інших видах діяльності, які загальнодоступні з офіційних статистичних джерел. Рекомендується збирати дані за видами діяльності, укрупненими до п'яти груп відповідно до таблиці 8.1.

Таблиця 8.1 — Види діяльності

Група	Вид діяльності
1	Сільське господарство, мисливство та лісове
	Рибальство
	Будівництво
	Переробна промисловість
2	Електроенергія, газ та водопостачання
	Транспорт, складське господарство та зв'язок
	Оптова торгівля
3	Роздрібна торгівля

Група	Вид діяльності
4	Готелі та ресторани
	Фінансове посередництво
	Діяльність щодо операцій з нерухомим майном та орендою; діяльність дослідна та комерційна
	Державне управління та оборона; обов'язкове соціальне страхування
	Освіта
	Охорона здоров'я та соціальні послуги
	Діяльність з надання комунальних, соціальних та інших персональних послуг
	Діяльність з ведення приватних домашніх господарств з найманим обслуговуванням
	Діяльність екстериторіальних організацій і органів
5	Неекономічна діяльність

Для оцінювання наповнення районів можуть використовуватися і інші дані, якщо такі є для області моделювання. Дані щодо розміщення об'єктів і населення в ідеальному випадку повинні бути деталізовані до рівня розрахункових транспортних районів.

8.6 Фактичні дані, що характеризують транспортні та пасажирські потоки

8.6.1 Обстеження інтенсивності руху транспортних засобів

Основними даними, необхідними для калібрування транспортної моделі, є значення інтенсивності руху на окремих ділянках транспортної мережі. Для збору даних проводяться польові обстеження, а також використовуються автоматичні детектори обліку інтенсивності.

Перед початком обстежень необхідно переконатися в тому, що умови руху в дні проведення обстежень однакові та відсутній вплив таких чинників як:

- погодні умови;
- ремонтні роботи;
- дорожньо-транспортні пригоди;
- масові заходи.

Для отримання найбільш достовірних даних натурні обстеження рекомендується проводити з квітня до жовтня. Тривалість замірів, час початку та закінчення уточнюється після аналізування наявної

статистичної інформації про інтенсивність за попередні часові періоди, а також в залежності від пори року та характеру переважаючого руху (місцеве або транзитне). Для мінімізації відхилень в одержуваних значеннях потрібно проводити обстеження в найбільш репрезентативні періоди, уникаючи святкових днів, днів шкільних канікул, періоду відпусток та інших нетипових періодів. Рівень інтенсивності вимірюється з розбивкою за типами транспортних засобів. Залежно від цілей і завдань польового дослідження під час замірів може бути врахована різна диференціація за типами, але в будь-якому випадку вона повинна бути узгоджена з диференціацією, яка використовується в транспортній моделі.

Під час вибору місць проведення контрольних обстежень потрібно дотримуватися наступних рекомендацій:

- підрахунки необхідно виконувати на основних магістралях/дорогах і транспортних вузлах, заміряючи в такому разі як прямі, так і поворотні потоки;
- кількість місць підрахунку всередині зони моделювання повинна приблизно дорівнювати кількості транспортних районів;
- підрахунки повинні (по можливості) покривати всі основні в'їзди-виїзди з області моделювання (кордони).

Конкретний набір місць підрахунку, на яких необхідно проводити контрольні обстеження, має бути уточнений на етапі вибору меж області моделювання і розробки схеми транспортного районування згідно з 10.4.

Рекомендується проводити контрольні обстеження шляхом відеозапису з подальшою обробкою відеоматеріалів і заповненням бланків обліку. Допускається проведення обстежень ручним способом з одночасним заповненням формулярів обліку на автомобільних дорогах з незначною інтенсивністю руху (до 200 авт/год в одному напрямку). Структура і зміст формуляра встановлюється виконавцем робіт виходячи

з особливостей проведених досліджень, необхідної диференціації транспортних засобів за групами, тривалості вимірів.

Результати обстежень фактичної інтенсивності руху підлягають приведенню до середньорічного показника інтенсивності руху з використанням коефіцієнтів розподілу за годинами доби, днях тижня і місяцях на основі даних з місць автоматичного обліку інтенсивності і складу потоку. У випадку неможливості отримання даних з місць автоматичного обліку за необхідний період допускається використання коефіцієнтів з аналогічних обстежень за ряд попередніх років, строк давності яких не перевищує 5 років. У крайніх випадках, при відсутності статистичних даних, допускається використання коефіцієнтів з додатку А ГБН В.2.3-37641918-552.

Точність вхідних даних щодо інтенсивності руху транспортних потоків повинна становити $\pm 5 \%$ для даних автоматичного обліку і $\pm 10 \%$ для даних, отриманих візуальним спостереженням, з рівнем довіри 95 %.

8.6.2 Обстеження пасажиропотоків на громадському транспорті

У випадках, коли в складі розрахунків планується моделювання пасажирських потоків згідно з 10.6 додатково виконується збір даних за:

- пасажиропотоками в основних перерізах дорожньої мережі та мережі позавуличного транспорту;
- обсягами входу і виходу пасажирів на зупинках маршрутного та громадського транспорту.

8.7 Дані соціологічних опитувань

8.7.1 Дані про структуру переміщень

Для калібрування моделі в частині розрахунку кореспонденцій, визначення параметрів розподілу переміщень за відстанями, розрахунку транзитних потоків необхідні додаткові дані, які характеризують структуру переміщень. Для отримання таких даних необхідні придорожні опитування водіїв, основна мета яких — з'ясувати, звідки, куди і з якою метою

відбувається поїздка, а також наскільки регулярно відбувається ця поїздка.

Під час проведення придорожніх опитувань рекомендується проводити опитування водіїв транспортних засобів у частках, що відповідають структурі транспортного потоку у відповідному місці підрахунку. Для забезпечення необхідної вибірки бажано проводити опитування у співпраці з працівниками державної автоінспекції.

Орієнтовна анкета, що застосовується під час проведення придорожніх опитувань, наведена в додатку Б. Виконавець, за погодженням із Замовником, може вносити додаткові питання або коригувати питання, що представленні вище для отримання найбільш зручної вибірки даних для використання в транспортному моделюванні.

8.7.2 Дані про транспортну поведінку населення

Для створення і калібрування транспортної моделі потрібен ряд показників, що характеризують транспортну поведінку населення:

- показники рухливості, тобто середня кількість переміщень, що здійснюються з різними цілями протягом певного періоду (наприклад, за добу);
- розподіл часу і довжини поїздок, що здійснюються з різними цілями;
- розподіл поїздок з різними цілями між видами транспорту.

Джерела даних для оцінювання чисельних значень цих параметрів:

- статистичні дані;
- соціологічне дослідження;
- світовий досвід;
- попередній досвід моделювання (успішне калібрування проєктів);
- визначення значень у ході калібрування моделі, яка розробляється.

Для надійного кількісного оцінювання всіх параметрів і закономірностей транспортної поведінки населення зазвичай застосовуються масштабні дорогі соціологічні дослідження, проведені шляхом опитувань і ведення «щоденників переміщень». Такі дослідження недоцільно проводити в рамках проєктів щодо прогнозування інтенсивності на окремих дорогах.

Оскільки в даний час в Україні відчувається серйозна нестача зазначених даних, рекомендується користуватися даними досліджень, проведених в Європейських країнах, які є у вільному доступі (наприклад, <http://www.tu-dresden.de/srv/>). Враховуючи можливі істотні відмінності показників у різних країнах, потрібно використовувати зазначені дані в якості початкових і уточнювати їх у процесі калібрування моделі, намагаючись узгодження розрахункових і фактичних даних. Рекомендується також накопичення даних з метою вироблення конкретних рекомендацій за чисельним значенням показників у майбутньому.

8.8 Вимоги до точності вихідних даних

Вимоги до точності вихідних даних повинні визначатися необхідною доцільністю, яка залежить від прийнятої похибки результатів моделювання, і від витрат на підвищення точності вхідних даних. Перераховані вище вхідні параметри для побудови моделі можна розділити на детерміновані і стохастичні.

До детермінованих відносяться незмінні, однозначно визначені параметри, такі як геометричні розміри, параметри ОДР, режими регулювання, параметри роботи ГПТ. Точність таких параметрів не залежить від часу витраченого на їх отримання або кількості обстежень, і відповідно повинні складати 100 %. Будь-яка невідповідність параметрів такого типу відноситься до розряду помилок введення, а не похибки при зборі даних.

До стохастичних параметрів відносяться, в основному, параметри транспортних і пасажирських потоків, такі як інтенсивність, швидкість, склад, а також похідні від них параметри умов руху — час руху, довжини черг, фактична пропускна спроможність тощо. Значення таких параметрів можуть коливатися в значних межах день у день, що ускладнює їх точне визначення. Для проведення якісного оцінювання необхідні усереднені значення параметрів такого типу. Рекомендується виконувати не менше трьох обстежень параметрів стохастичного типу. Далі потрібно оцінити розрізненість отриманих значень. Якщо відхилення від середнього становить понад 20 %, необхідно провести додаткові обстеження.

9 РОЗРОБКА І КАЛІБРУВАННЯ МОДЕЛІ БАЗОВОГО РОКУ

9.1 Загальні положення

Методичною основою транспортної моделі є класична 4-крокова модель розрахунку транспортного попиту. Переваги використання саме цієї моделі пов'язані з тим, що вона досить точно описує всі етапи формування попиту на транспорт, дозволяючи працювати, при цьому, з агрегованими даними без затрат в якості результатів моделювання. Це, у свою чергу, скорочує час розрахунку і дозволяє оцінювати більшу кількість прогнозних сценаріїв за одиницю часу.

9.2 Облік різних видів транспорту

У рамках класичної 4-крокової моделі, в загальному випадку, передбачається розрахунок розподілу кореспонденцій щодо використання різних видів транспорту: легкового, вантажного та пасажирського.

Вантажні транспортні засоби поділяються за вантажопідйомністю та кількості осей на три типи: легкі, середні і важкі (див. табл. 9.1).

Таблиця 9.1 — Типи вантажних транспортних засобів

Тип	Опис	Габарит
Легкі	Автомобілі з причепом вище 2м, фургони на легкових шасі, пікапи і міні-фургони	$2\text{ м} < H < 2.60\text{м}$
Середні	Автомобілі для перевезення важких вантажів з 2 осями	$H \geq 2.60\text{м}$
Важкі	Автомобілі для перевезення важких вантажів з 3 або більше осями (вантажівки і транспортні засоби з причепом вище 2.6 метрів)	$H \geq 2.60\text{м}$

Коефіцієнти приведення до легкового автомобіля рекомендується приймати відповідно до додатку А ДБН В.2.3-4 та/або таблиці 4.1 ДБН В.2.3-5.

9.3 Шари переміщень (цілі поїздки)

Всі переміщення діляться за цілями переміщень: «на роботу», «в магазин», «в школу» тощо. Переміщення, що здійснюються з різними цілями, відносяться до різних «шарів». Переміщення різних шарів можуть сильно відрізнятися за дальністю, а також по-різному розподілятися за часом доби, тому для кожного шару розраховується окрема матриця кореспонденцій.

Всі ці аспекти відіграють ключову роль під час моделюванні внутрішньоміських переміщень. Під час моделювання ділянок магістралей і доріг, які використовуються в основному для міжміських поїздки, допускають використання єдиного уніфікованого шару міжміських переміщень на легковому автомобілі. Однак, для ділянок поблизу великих міст, де значна частка щоденних місцевих поїздки, необхідно розглядати як мінімум 2 типа об'єктів тяжіння: «робота» та «інше». При цьому виникає 6 шарів переміщень між об'єктами типу «дім», «робота» та «інше» (переміщення в одну і іншу сторону вважаються тими, які відносяться до різних шарів).

Під час моделювання довгої ділянки дороги, що проходить повз декілька великих міст, рекомендується розглядати як уніфікований шар міжміських переміщень, так і зазначені вище шари для місцевих переміщень, прибуття і відправлення яких зосереджені поблизу міст.

9.4 Створення графу мережі

Граф мережі складається з вузлів (перехресть та розв'язок) та відрізків, що їх з'єднують (вулиці, дороги), що робить переміщення доступними для учасників транспортного руху та описує затрати на дані переміщення. Кожному елементу графу присвоюються модельні характеристики, які наведені в 8.1.

Однією з головних характеристик відрізків є функція, що відображає залежність часу проїзду відрізком від його завантаженості усіма типами транспортних засобів. Характеристики відрізків, перераховані в складі вихідних даних у 8.1, використовуються в основному для визначення параметрів цих функцій. Наведені функції називаються функціями VDF (Volume Delay Function; використовується також термін Capacity Restraint - CR-функції).

Під час створення графу мережі рекомендується типізувати всі відрізки в графі, зіставивши кожному типу певний набір параметрів і певну функцію VDF. Рекомендований вид функції VDF:

$$t = t_0 \left(1 + a \left(\frac{N}{N_0} \right)^b \right), t_0 = L/V_0 \quad (9.1)$$

де t — час проїзду відрізком з урахуванням завантаженості;

t_0 — час проїзду незавантаженим відрізком;

V_0 — швидкість проїзду незавантаженим відрізком;

L — довжина відрізка;

N — сумарна інтенсивність транспортного потоку;

N_0 — пропускна здатність відрізка;

a і b — калібрувальні константи.

Для побудови графу мережі рекомендується використовувати наявні для області моделювання цифрові карти в форматі ГІС або якісні растрові карти в якості підкладки для подальшого переведення інформації в цифрову форму.

9.5 Транспортне районування

Для опису розподілу об'єктів, що генерують переміщення, необхідно розділити область моделювання на райони прибуття і відправлення. Кожний транспортний район включається в граф як вузол, з'єднаний зі звичайними вузлами графа мережі спеціальними примиканнями (коннекторами).

В опис системи транспортних районів входять:

- межі районів;
- умовні центри (центроїди) районів;
- примикання (коннектори), що з'єднують умовні центри районів з вузлами мережі.

Межі транспортних районів потрібні для визначення того, які об'єкти потрапляють до території району, та для оцінювання ємності районів щодо параметрів прибуття та відправлень. Під час визначення меж транспортних районів потрібно дотримуватися наступних принципів:

- використання ліній природних і штучних перешкод (річки, лінії залізниць тощо);
- узгодження з адміністративним поділом території;
- врахування функціонального зонування території міста;
- збереження сформованих кварталів забудови;
- недопущення районів витягнутої конфігурації.

Райони можуть мати кілька точок підключення до мережі — конекторів. Підключення повинні входити до ділянок мережі найменшого класу. Підключення — це умовні зв'язки, вони не відповідають фізичним об'єктам. Рух за цими підключеннями відповідає виходу або виїзду з дворів і дрібних вулиць до потрапляння у транспортні розв'язки мережі.

Необхідний для цього середній час вказується в якості характеристики підключення.

Самі межі транспортних районів не є критичними показниками для розрахунків транспортної моделі, так як до складу графа мережі входять тільки умовні центри і підключення.

Кількість транспортних районів — це критичний параметр з точки зору затрат обчислювальних ресурсів. Під час транспортного районування рекомендовано дотримуватися наступних принципів:

- важливі магістралі, перетини і станції позавуличного транспорту повинні розташовуватися всередині районів;

- межі районів повинні, по можливості, проходити у місцях природних перешкод, таких як лісова смуга, річка, а також межами областей, великих доріг або станцій, залізниць;

- рекомендується узгоджувати систему районів з адміністративним поділом території. Це полегшує можливість збору вихідних даних за районами і дозволяє агрегувати результати до рівня адміністративних районів;

- не обов'язково слідувати критерієм рівності районів за площею або чисельності населення. Так, рекомендується виділяти дрібніші райони в тих областях території, які прилягають до найбільш завантажених і важливих ділянок доріг, а більші райони;

- на краю області моделювання.

9.6 Розрахунок транспортного попиту

9.6.1 Генерація переміщень населення

Генерація транспортних потоків (переміщення населення) — це оцінювання сумарних обсягів прибуття і відправлень у кожному розрахунковому транспортному районі. Оцінювання кількості прибуття та відправлень проводиться окремо для кожного шару переміщень на основі наступних даних:

- про просторове розселення населення та інших об'єктів утворення й притягнення переміщень, що відносяться до даного шару;
- про рухомість населення, тобто середня кількість поїздок у даному шарі, що здійснюються протягом доби.

Загальна послідовність розрахунку наступна: виходячи з коефіцієнта рухомості і загальної кількості населення оцінюють загальну кількість переміщень даного шару в моделі. Обсяги прибуття і відправлень у всіх районах розраховують, розподіляючи загальну їх кількість між районами пропорційно оцінці просторового розміщення об'єктів утворення і притягнення. Приклад розрахунку кількості прибуття та відправлень наведено в додатку В.

Зазначена послідовність розрахунків використовується для всіх шарів без змін. В якості оцінювання ємності районів можуть виступати різні соціально-економічні характеристики, наприклад, кількість робочих місць у різних видах діяльності, торгові площі тощо.

Показники рухомості для різних шарів переміщень, характерних для умов України, можуть уточнюватися під час калібрування моделей, а також у міру накопичення даних соціологічних досліджень і досвіду практичного моделювання.

9.6.2 Генерація вантажних переміщень

Об'єктами, що генерують потоки вантажних транспортних засобів у містах та регіонах, є промислові підприємства, логістичні центри, сільськогосподарські та торгові об'єкти, об'єкти будівництва та сфери послуг, офіси, різні установи, а також населення (домогосподарства). Сумарні обсяги прибуття і відправлень вантажних транспортних засобів розраховуються виходячи з припущення про їх лінійну залежність від кількості робочих місць. У такому разі для робочих місць, пов'язаних з різними видами діяльності (торгівля, промисловість тощо), застосовуються різні коефіцієнти утворення вантажного руху.

Для реалізації такого методу всі види діяльності розділені на п'ять груп, наведених у таблиці 8.1 згідно 8.5. Вантажні транспортні засоби розділені на 3 типи, наведених у таблиці 9.1 згідно 9.2.

Існує певна регресійна залежність, що характеризує зміни коефіцієнтів утворення і притягнення вантажних транспортних засобів у залежності від видів діяльності (таблиця 9.2). Для кожного типу вантажних транспортних засобів та кожного виду діяльності зазначено середню кількість вантажних переміщень на добу, в розрахунку на одного зайнятого.

Таблиця 9.2 — Коефіцієнти утворення та притягнення для кожного виду діяльності

Тип вантажних транспортних засобів	Групи за видами діяльності				
	1	2	3	4	5
легкі	0,200	0,094	0,160	0,044	0,045
середні	0,145	0,048	0,127	0,014	0,020
важкі	0,174	0,062	0,065	0,005	0,016
Всього	0,518	0,205	0,351	0,063	0,081

9.7 Розрахунок матриць кореспонденцій

Для розрахунку міжрайонних переміщень (кореспонденцій) застосовуються спеціальні математичні моделі та алгоритми. Допускається застосування різних математичних алгоритмів, запропонованих розробниками спеціалізованих програм транспортного моделювання, апробованих і опублікованих у науковій літературі, за умови дотримання базових вимог цих методичних рекомендацій.

9.7.1 Розрахунок матриць затрат

Базовим положенням для розрахунку міжрайонних кореспонденцій є наступне: кореспонденцій з одного району в інший буде тим більше, чим більша ємність районів за кількістю прибуття і відправлень, і чим ближче один до одного розташовані ці райони. Близькість або дальність районів

розуміється не в географічному, а в транспортному сенсі, як деяка комплексна оцінка швидкості та зручності переміщень транспортною мережею. Для розрахунку у цих методичних рекомендаціях доцільно в якості чисельної міри відстаней використовувати узагальнені затрати на переміщення з району в район за оптимальним шляхом. Тим самим забезпечується узгодженість розрахунку кореспонденцій з процедурою розподілу кореспонденцій за видами транспорту згідно 9.7, а також з розподілом кореспонденцій за шляхами в мережі згідно 9.10.

Таким чином, першим кроком у розрахунку матриць кореспонденцій є розрахунок матриць затрат між кожною парою транспортних районів. Узагальнені затрати визначаються як сума затрат на переміщення за всіма відрізками мережі, що входять до відповідного шляху, а також затрат на всіх вузлах (поворотах) та примиканнях. Для розрахунку матриці затрат необхідно для кожної пари районів (i) та (j) відшукати оптимальний шлях (шлях з найменшими затратами). Крім окремих гранично простих випадків це неможливо виконати вручну. Для вирішення цього завдання використовуються спеціальні швидкодіючі алгоритми пошуку оптимальних шляхів по графу, які входять до складу програм транспортного моделювання.

Розрахунок матриць затрат на переміщення проводиться окремо для всіх видів транспорту.

У разі, коли в моделі враховується взаємний вплив легкового та ГПТ, розраховується також матриця відповідних узагальнених затрат на ГПТ. У такому випадку, спочатку розраховуються матриці сумарних кореспонденцій як на легковому, так і на громадському транспорті, а потім сумарні матриці розщеплюються за видами транспорту згідно 6.10. Для оцінювання міжрайонних переміщень під час розрахунку сумарних матриць необхідно усереднити узагальнені затрати на легковому і громадському транспорті. Допустимим способом усереднення є взяття

середньозваженого показника з постійними ваговими коефіцієнтами. Розрахунок проводиться за формулою (9.2).

$$t_{ij} = \sum_k t_{ij}^k a^k, \quad (9.2)$$

де: k — індекс що нумерує види транспорту,

t_{ij}^k — сумарні затрати на переміщення для виду k ,

t_{ij} — сумарні затрати, усереднені за видами транспорту,

a^k — вагові коефіцієнти, що задовольняють умові $\sum_k a^k = 1$.

Чисельні значення a^k можна прийняти рівними середнім коефіцієнтам розщеплення за видами транспорту згідно з даними натурних обстежень.

Примітка. Можливе застосування більш складних математичних методів отримання усередненої за видами транспорту оцінки узагальнених затрат, пропонованих у науковій літературі з теорії дискретного вибору.

9.7.2 Розрахунок кореспонденцій

Зменшення кореспонденцій зі збільшенням відстаней описується функцією притягнення. Зазначена функція розраховується за формулою:

$$c(t) = ae^{-bt}, \text{ або } c(t) = \left(1 + \left(\frac{t}{c}\right)^b\right)^{-a} \quad (9.3)$$

де a, b, c — константи, які визначаються в ході калібрування.

Переміщення, що відносяться до різних шарів, по-різному чутливі до чиннику відстаней. Тому параметри функції тяжіння, які застосовуються до різних шарів, можуть відрізнятися і уточнюватися в процесі калібрування моделі.

Типовою математичною моделлю для розрахунку міжрайонних кореспонденцій є гравітаційна модель. У цій моделі матриця кореспонденцій розраховується окремо для кожного шару переміщень за формулами (9.4) та (9.5).

$$N_{ij} = A_i B_j O_i D_j c(t_{ij}) \quad (9.4)$$

де кожна пара районів i та $j = 1, \dots, R$;

O_i — сумарний обсяг відправлень з району i ;

D_j — сумарний обсяг прибуття в район j ;

t_{ij} — дальність між районами i та j (усереднена за видами транспорту, обчислена на попередньому кроці).

$c(t_{ij})$ — функція притягнення між районами i та j .

A_i і B_j — коефіцієнти балансування, які визначаються шляхом вирішення системи рівнянь, яка виражає баланс прибуття і відправлень у кожному районі:

$$O_i = \sum_j N_{ij} \text{ та } D_j = \sum_i N_{ij} \quad (9.5)$$

Визначена система рівнянь вирішується на комп'ютері із застосуванням спеціального ітераційного алгоритму балансування, який входить до складу програм транспортного моделювання.

Розраховані зазначеним способом добові матриці кореспонденцій можуть, за необхідності, бути приведені до годинних матриць (для середньої години або години пік) множенням на коефіцієнти нерівномірності руху транспортного потоку, які були визначені під час натурних обстеженнях.

Допускається застосування інших математичних алгоритмів, запропонованих розробниками професійних програм транспортного моделювання і опублікованих у науковій літературі, за умови дотримання базових вимог цих методичних рекомендацій.

9.8 Розподіл кореспонденцій за видами транспорту

Розподіл кореспонденцій за видами транспорту (модальний розподіл) проводиться індивідуально для кожної пари районів на основі зіставлення узагальнених затрат на переміщення, що здійснюються різними видами транспорту. Маршрутні таксі в містах є природною частиною громадського пасажирського транспорту. Однак, під час

моделювання міжміських поїздок більш правильно розглядати маршрутні таксі як особливий вид легкового транспорту (з підвищеною місткістю).

Завдання розподілу кореспонденцій за видами транспорту є окремим випадком завдання дискретного вибору, для вирішення якого є добре розроблена теорія (discrete choice theory). Найбільш поширеною моделлю такого вибору є LOGIT-модель. У рамках цієї моделі вводяться функції корисності, що оцінюють привабливість (або корисність) вибору альтернатив — у нашому випадку, видів транспорту. Необхідно оцінювати корисність пропорційно узагальненим затратам на переміщення, взятим з протилежним знаком, оскільки зростання затрат, очевидно, відповідає зменшенню корисності. Якщо t_k — узагальнені затрати, а U_k — корисність вибору k -го виду транспорту, то:

$$U_k = -\alpha_k t_k + \beta_k. \quad (9.6)$$

Коефіцієнти розподілу за видами транспорту S_k обчислюються за значеннями корисності за формулою (9.7):

$$S_k = e^{U_k} / \sum_j e^{U_j} \quad (9.7)$$

Коефіцієнти у формулі (9.6) визначаються в ході калібрування моделі. Ці коефіцієнти істотно залежать від рівня автомобілізації населення. Зокрема, при перспективному плануванні слід коригувати ці коефіцієнти з урахуванням прогнозованого збільшення автомобілізації.

Примітка. Крім експоненціальних функцій у формулі (9.7) в професійному програмному забезпеченні транспортного моделювання застосовуються й інші аналітичні вирази.

9.9 Розрахунок кордонних кореспонденцій

Кордонними кореспонденціями є такі, що в'їжджають в область моделювання або виїжджають з неї через кордони транспортних районів (кордонні кореспонденції, що проходять наскрізь через область, називаються транзитними). Особливість кордонних кореспонденцій полягає в тому, що

- райони відправлень і/або прибуття цих кореспонденцій розташовані в невизначених місцях за межами області моделювання;
- для цих кореспонденцій не визначені узагальнені затрати, оскільки невідома частина шляхів знаходиться за межами області моделювання.

Для розрахунку цих кореспонденцій в системі розрахункових районів формально визначаються умовні «кордонні» райони. Обсяги прибуття і відправлень для кордонних районів не розраховуються, а оцінюються на основі натурних обстежень на межі області моделювання. Для розрахунку кордонних кореспонденцій наближено може бути застосована гравітаційна модель, проте чутливість цих кореспонденцій до фактору відстаней повинна бути ослаблена в порівнянні з кореспонденціями всередині області. Модельний розподіл кордонних кореспонденцій за видами транспорту не проводиться, обсяги прибуття і відправлень відразу задаються в розбивці за типами транспортних засобів.

9.10 Розподіл кореспонденцій за мережею

Завершальний крок прогнозування транспортних потоків — розподіл міжрайонних кореспонденцій за конкретними шляхами в транспортній мережі.

Розрахунок проводять за системою рівноважного розподілу потоків. Рівноважний розподіл потоків — це розподіл автомобільних потоків з різних альтернативних шляхів у мережі, що виникає в результаті прагнення всіх учасників руху зменшити узагальнені затрати своєї поїздки в мережі з обмеженою пропускнуою здатністю. У результаті вибору усіма учасниками руху (на підставі попереднього досвіду) оптимальних шляхів, виникає розподіл, в якому вже жоден учасник не може так змінити свій шлях, щоб зменшити його затрати. Саме такий розподіл називається рівноважним.

Математично задача пошуку рівноважного розподілу потоків зводиться до наступної задачі математичного програмування:

$$\sum_i \int_0^{u_i} t_i(v) dv \rightarrow \min, \quad (9.8)$$

де u_i — сумарна приведена інтенсивність потоку на i -ому відрізку;

$t_i(v)$ — функція, що описує залежність узагальненої затрат за i -м відрізком від цієї інтенсивності.

u_{π}^{rq} — кореспонденція з району r в район q , розподілену на певний шлях π , що з'єднує ці райони.

$$u_i = \sum_{\pi \in \pi} u_{\pi}^{rq}. \quad (9.9)$$

Сукупність цих величин повністю визначає розподіл кореспонденцій, при цьому виконана умова, а мінімізація в (8) забезпечується за наступних обмежень:

$$\sum_{\pi} u_{\pi}^{rq} = N^{rq}, \quad u_{\pi}^{rq} \geq 0. \quad (9.10)$$

Зазначена модель, характеризує навантаження на мережу в умовах великої щільності потоку.

Для обліку взаємного впливу різних типів транспортних засобів необхідно використовувати алгоритм пошуку рівноважного розподілу, одночасно здійснюючи розподіл потоків декількох класів користувачів. Під час розрахунку алгоритму для кожного класу користувачів розраховується матриця кореспонденцій. У розподілі беруть участь тільки автомобілі, але також потрібно враховувати завантаженість автобусів. Для цього використовуються частота руху, задану для всіх маршрутів або для всіх відрізків мережі.

9.11 Метод ітерацій у розрахунку

Наведена в цих методичних рекомендаціях послідовність розрахунку має наступну важливу особливість. Розрахунок починається з визначення узагальнених затрат міжрайонних переміщень згідно 9.7.1. Однак самі ці затрати залежать від результуючого завантаження елементів транспортної мережі. Отже, після розрахунку матриць і розподілу кореспонденцій за мережею ми отримаємо на виході відмінні затрати міжрайонних переміщень від тих, що отримали спочатку.

Для того, щоб описаний розрахунок був коректним, необхідно кілька разів циклічно повторити кроки розрахунків, починаючи з обчислення матриць затрат згідно 9.7.1 і закінчуючи розподілом кореспонденцій за мережею згідно 9.10. У такому разі узагальнені затрати на кожній ітерації розраховуються з урахуванням завантаження мережі, досягнутої на попередній ітерації (див. рис. 9.1).



Рисунок 9.1 — Алгоритм розрахунку моделі

Для зменшення коливань розрахункових значень від ітерації до ітерації рекомендується на кожному наближенні усереднювати матриці узагальнених затрат, отриманих у результаті виконання положень 9.7.1, на даній і попередній ітерації. Як показує практика, якщо розрахунок починається з «порожньої» мережі, рекомендується виконати не менше ніж (6—8) ітерацій циклу. Зменшити необхідну кількість ітерацій до (2—3) можна, якщо розрахунок кожного нового каліброваного (або прогнозного) варіанту починати не з «порожньої» мережі, а з матриць, отриманих в іншій, вже завершній перевірці моделі. Точне значення необхідної кількості ітерацій описаного процесу для кожного конкретного проекту

можна оцінити, відстежуючи зміну розрахункових результатів з ходом наближень. Якщо зміни розрахункових значень інтенсивності на важливих перетинах не перевищують (3—5) %, то ітерації можна зупинити.

9.12 Валідація та калібрування моделі базового року

Валідація моделі (model validation) — перевірка відповідності даних, одержуваних в процесі машинної імітації, реальному ходу явищ, для опису яких створена модель. Вона проводиться тоді, коли експериментатор переконався на попередній стадії (верифікації) в правильності структури (логіки) моделі, і полягає в тому, що вихідні дані після розрахунку на комп'ютері зіставляються з наявними статистичними відомостями про моделюється систему.

Після введення всіх вихідних даних і проведення розрахунку транспортних потоків за обраною методикою проводиться валідація моделі, тобто перевіряється відповідність результатів моделювання наявними фактичними даними.

9.12.1 Валідація моделі

Метою етапу валідації моделі є визначення того факту, що модель придатна для проведення експериментального аналізування об'єкта дослідження.

Перевірка відповідності даних моделі ґрунтується на порівняльному аналізі вихідних характеристик реальної системи і підсумкових даних, одержаних у результаті виконання експериментів над комп'ютерною моделлю. Трудомісткість етапу валідації залежить від якості і методики проведення калібрування моделі. У такому разі ключову роль відіграє не ступінь схожості результатів, а вибрані параметри для налаштувань. Хороша відповідність результатів моделювання з реальними даними у результаті калібрування може бути досягнута за різних поєднань параметрів елементів моделі, і такий результат не гарантує, що модель залишиться адекватною у разі іншого набору вихідних даних. Таким чином, на етапі валідації може знадобитися кілька ітерацій повторного

калібрування моделі. Всі зміни, внесені пізніше, повинні бути відображені в звіті про розробку моделі. Підсумкове рішення про достовірність моделі приймається відповідальним фахівцем виконавця за результатами обговорення із зацікавленими сторонами.

Після проведення валідації рекомендується узгодити і зафіксувати окремим актом із зацікавленими сторонами, що модель побудована правильно і придатна для подальшого використання. За необхідності може бути проведена незалежна експертиза (аудит) моделі.

Етапи калібрування та перевірки даних моделей пред'являють найвищі вимоги до кваліфікації і досвідченості фахівця з моделювання. На виході етапу валідації має бути отримана підсумкова модель, яка на підставі проведеного аналізування вважається придатною для подальших експериментів.

9.12.2 Калібрування моделі

Основні дані, які використовуються для оцінювання якості моделі, це результати замірів інтенсивності транспортного потоку. При порівнянні модельних і фактичних значень допустимим відхиленням на відрізках з високими (фактично декількох тисяч авт/добу) значеннями інтенсивності можна вважати відхилення в межах 20 %. Пріоритетним є покращення збігу на ключових перерізах з високою інтенсивністю транспортного потоку, в той час як у перерізах з низькою інтенсивністю (менше ніж 1000 авт/добу) допустимі відносно значні відхилення.

В якості агрегованого оцінювання якості можуть використовуватись:

- середня відносна похибка — середнє відхилення абсолютних значень на всіх перерізах, які обстежувались;
- коефіцієнт кореляції між сумами модельних і фактичних значень інтенсивності потоків у місцях підрахунку та сумарної інтенсивності на всіх перерізах.

Додатковим джерелом даних для калібрування є дані опитування, що характеризують структуру переміщень в області моделювання згідно

8.7. Ці дані використовуються для калібрування матриць кореспонденцій. Оскільки для чисельного оцінювання окремих елементів матриць кореспонденцій потрібна дуже велика вибірка (проведення таких масштабних опитувань недоцільно), рекомендується зіставляти агреговані показники, пов'язані з кореспонденціями, враховуючи розподіл матриць за відстанями переміщень та частку транзиту в місцях проведення опитувань.

Процес калібрування рекомендується починати з налаштування загальних параметрів калібрування, таких як параметри рухомості, параметри функцій притягнення тощо. Потім, за необхідності, можливе локальне коригування характеристик елементів транспортної мережі і даних про ємність районів. Калібрування повинно проводитися як на перегонах, так і за напрямками руху на перехрестях (поворотах), а також за всіма періодами аналізу.

У процесі калібрування рекомендується на кожному прогоні моделі змінювати тільки один параметр і перевіряти його вплив на результати розрахунку. Якщо на один і той же об'єкт впливають кілька параметрів, необхідно провести кілька випробувань і вибрати оптимальний набір значень параметрів.

Для оцінювання відповідності вимогам транспортних моделей як на етапі калібрування, так і при валідації, використовують загальноприйняті статистичні критерії, які дозволяють швидко оцінювати основні якісні параметри створених моделей.

Середня абсолютна помилка — середнє відхилення абсолютних значень (різниця між значеннями що спостерігаються та розраховуються)

$$(\overline{\delta_a}) = \frac{1}{p} \cdot \sum abs(N_i - U_i), \quad (9.11)$$

де N_i — інтенсивність потоку, виміряна на місці підрахунку з номером i ;

U_i — розраховане на основі моделі значення навантаження на дорогу, на якій встановлено місце підрахунку з номером i ;

P — кількість місць підрахунку.

Середня відносна помилка — середнє відхилення відносних значень:

$$(\overline{\delta_r}) = \frac{\sum abs(N_i - U_i)}{\sum P_i} \cdot 100 \%, \quad (9.12)$$

де N_i — інтенсивність потоку, виміряна на місці підрахунку з номером i ;

U_i — розраховане на основі моделі значення навантаження на дорогу, на якій встановлено місце підрахунку з номером i ;

P_i — кількість місць підрахунку з номером i .

Абсолютна значення RMSE (root of mean squared error) — середнє квадратичне відхилення, яке характеризує показники розсіювання спостережуваних явищ:

$$(\sigma_a) = \left[\sum_{i=1}^p (N_i - U_i)^2 / P \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (9.13)$$

Відносне значення RMSE (root of mean squared error):

$$(\sigma_3) = \frac{\sigma_a}{\sum N_i / P} = \frac{\sqrt{\sum (N_i - U_i)^2 / (P - 1)}}{\sum N_i / P} \quad (9.14)$$

Для визначення ступеня тісноти лінійного зв'язку між фактичними даними інтенсивності потоків на місцях підрахунку і розрахунковими показниками, розраховують коефіцієнт кореляції. Він приймає значення в діапазоні від мінус 1 до 1. Чим ближче значення коефіцієнта кореляції до 1, тим точніше ряд розрахункових значень наближається до фактичних даних, тобто модель точніше показує поведінку транспортного потоку.

$$r = \frac{\sum(N_i - \bar{N}) \cdot (U_i - \bar{U})}{\sqrt{\sum(N_i - \bar{N})^2 \cdot \sum(U_i - \bar{U})^2}} \quad (9.15)$$

$$\bar{N} = \frac{1}{P} \sum N_i, \quad \bar{U} = \frac{1}{P} \sum U_i, \quad (9.16) \quad (9.17)$$

де N_i — інтенсивність потоку, виміряна на місці підрахунку з номером i ;

U_i — розраховане на основі моделі значення навантаження на дорогу, на якій встановлено місце підрахунку з номером i ;

P — кількість місць підрахунку;

$\bar{N}, \bar{U}$ — середні за мережею значення фактичних інтенсивностей і розрахункових навантажень на місцях підрахунку, які визначаються за формулами.

У процесі перевірки розрахунків доцільно розрахувати показники хі-квадрат тесту, які дають можливість перевірити, чи може відхилення множини дорівнювати деякому попередньо визначеному значенню. Для цього розрахунку використовуємо GEH статистику:

$$GEH = \sqrt{\frac{(U - N)^2}{(U + N)/2}} \quad (9.18)$$

За проведеними розрахунками, якщо відносні показники коливаються в межах не більше ніж 10 % у цілому за мережею, що моделюється і не більше ніж 5 % для локальних ділянок, а коефіцієнт кореляції не менше 0,8 та значення GEH статистики менш ніж 5 для 85 % випадків, то така модель вважається прийнятною до практичного застосування.

На виході етапу калібрування має бути отримана модель з достатньою точністю відтворення параметрів роботи і умов руху на досліджуваній ділянці, які достатньо наближені до показників отриманих під час проведення обстеження.

Процес калібрування повинен бути детально задокументовано в відповідному розділі загального звіту про побудову моделі.

10 РОЗРОБКА ПРОГНОЗОВАНОЇ МОДЕЛІ

Після того як модель пройшла калібрування та затвердження вважається, що вона придатна не тільки для оцінювання рішень у поточних умовах, а й для аналізування рішень на перспективу. Як правило, горизонти перспективного аналізування знаходяться в межах від 5 років до 30 років. Однак необхідно враховувати ряд особливостей, які можуть вплинути на якість результатів.

10.1 Необхідні дані для прогнозованої моделі

Прогнозовані моделі транспортних потоків на майбутні роки розробляються шляхом внесення коректив у модель базового року. Для їх створення необхідно провести додаткові дослідження і зібрати наступні дані:

1. Прогноз зміни соціально-економічних і демографічних показників (чисельність населення, чисельність працівників тощо) на території моделювання. Відповідно зміниться оцінювання загальних обсягів прибуття і відправлень згідно з 9.5.

2. Прогноз зростання рівня автомобілізації населення. Зростання рівня автомобілізації впливає на коефіцієнти в моделі розподілу поїздок за видами транспорту, а також на зростання кордонних кореспонденцій.

3. Проектні зміни у вулично-дорожній мережі, мережі автомобільних і залізничних доріг, системі громадського пасажирського транспорту.

4. Прогноз зміни в оцінюванні вартості часу. Цей прогноз може бути виконаний на основі прогнозу зміни таких показників, як валовий регіональний продукт, рівень заробітної плати населення тощо.

Перераховані дані повинні формуватися на основі аналізування прогнозів і програм розвитку транспортного комплексу України, аналізування містобудівних планів і стратегій розвитку територій, що входять у зону тяжіння досліджуваного об'єкта, а також інших документів, що містять інформацію про прогнози розвитку територій в області дослідження.

10.2 Визначення сценаріїв розрахунку

З урахуванням прогнозу зміни параметрів, отриманих на попередньому етапі, а також вимог проекту за цим періодом, необхідно сформулювати різні сценарії для моделювання. Рекомендується виконувати моделювання:

- для різних варіантів прогнозу розвитку соціально-економічної ситуації (наприклад, песимістичного і оптимістичного, найбільш ймовірного сценарію);
- для різних варіантів розвитку перспективної мережі (реалізація різних проектів розвитку).

Рекомендується виконувати розрахунок на 5, 10, 20 і 30-річну перспективу з інтерполяцією результатів на проміжні роки. На більш далеку перспективу результати моделювання допускається екстраполювати. На найближчу перспективу (до 5 років від базового року) рекомендується проводити розрахунок на кожен рік.

10.3 Результати моделювання транспортних потоків

Результати розрахунку наводяться в різних видах з розподілом за типами транспортних засобів.

Форми представлення даних:

- числова (електронні таблиці);
- графічна (на карті засобами спеціалізованого ПЗ);
- повна база даних моделі (в форматі спеціалізованого ПЗ, яке використовується).

ДОДАТОК А
(довідковий)
**БАЗОВІ ПОНЯТТЯ І ПІДХОДИ ТРАНСПОРТНОГО
МОДЕЛЮВАННЯ**

А.1 Класифікація методів моделювання транспортних потоків

За весь час розвитку теорії транспортних потоків з'явилося безліч способів математичного опису процесів поведінки як потоків у цілому, так і окремих автомобілів та їх взаємодії між собою і транспортною інфраструктурою. Багато методів набули широкого поширення на практиці для транспортного моделювання поведінки транспортних потоків з метою прогнозування та оцінювання їх параметрів. Існуючі методи транспортного моделювання використовують різний математичний апарат, ґрунтуються на різних припущеннях, мають різну ступінь деталізації і, відповідно, характеризуються різними функціональними властивостями, недоліками та перевагами.

Ключовою класифікаційною ознакою різних методів моделювання є спосіб опису об'єкта транспортного моделювання. Об'єктом транспортного моделювання є транспортний потік, і з точки зору способу його опису можна виділити моделі формування попиту (travel demand models) та моделі безпосередньо транспортних потоків (traffic flow models). Перший тип моделей дає тільки кількісну характеристику — обсяг руху або рівень попиту з поділом на різні види транспорту, а другий описує взаємозв'язки внутрішніх параметрів потоку і показників роботи ділянок мережі.

Другою основною класифікаційною ознакою є тип транспорту і кореспонденцій. Відповідно до зазначеного, поділ йде на моделі пасажирських і вантажних кореспонденцій, а також моделі пішохідних потоків.

З точки зору підходу до опису процесу формування людських і матеріальних потоків, моделі формування попиту можна розділити на агреговані і дезагреговані.

Агрегована модель оцінює обсяг поїздок, виходячи з узагальнених параметрів кожного транспортного району, таких як кількість жителів, структура населення, кількість місць праці населення, рівень автомобілізації, транспортна рухливість населення, наявність і характеристики вантажо-генеруючих об'єктів тощо.

Дезагреговані моделі або поведінкові моделі (activity-based models) припускають, що транспортні потреби населення визначаються потребою брати участь у певній діяльності в різний час і в різних місцях. Кожне домогосподарство або навіть окремих житель розглядається як одиниця, здатна приймати рішення. Конкретна транспортна поведінка визначається, виходячи з прагнення мінімізувати витрати і максимізувати вигоди від різної діяльності. У даному типі моделей застосовується математичний апарат методів умовної оптимізації та теорії дискретного вибору.

Моделі безпосередньо транспортних потоків — це математичні моделі. Самі такі моделі не застосовуються на практиці в чистому вигляді, а використовуються в якості математичної основи в спеціальних програмних комплексах.

Опис транспортного потоку розділяється на:

- агрегований (макро-), що оперує загальними параметрами (швидкість, щільність, інтенсивність руху);
- дезагрегований (мікро-), де враховуються закономірності руху окремих автомобілів або їх невеликих груп.

За способом отримання інформації про транспортний потік моделі діляться на:

- аналітичні моделі, які засновані на теоретичних і емпіричних залежностях між параметрами транспортного потоку і транспортної інфраструктури;

- імітаційні моделі, які прагнуть описати і відтворити в часі процеси руху транспортних потоків і їх взаємодії з транспортною інфраструктурою.

Відповідно до зазначеного, моделі транспортних потоків поділяються на:

- аналітичні макромоделі;
- аналітичні мікромоделі;
- імітаційні макромоделі;
- імітаційні мікромоделі.

Аналітичні макромоделі є статичним розподілом потоків за мережею, виходячи з залежностей швидкості і щільності потоку, отриманих на основі фундаментальної діаграми. Такий тип використовується також у класичній 4-х кроковій моделі і присутній у всіх програмних пакетах для транспортного планування (EMME, CUBE, VISUM тощо).

Аналітичні мікромоделі — це більш детальний опис залежностей, заснований на теорії транспортних потоків. Такий підхід використовується, як правило, в програмних продуктах, призначених для аналізу локальних об'єктів (перехресть, ділянок магістралей, розв'язок, кругових перетинів), до них відносяться, наприклад, SIDRA INTERSECTION, HCS, ARCADY тощо.

Імітаційні макромоделі описують динаміку розвитку ситуації на ділянці транспортної мережі в поняттях транспортних потоків. Такий підхід характерний для програмних продуктів з оптимізації режимів світлофорного регулювання (TRANSYT, SATURN, SYNCHRO тощо).

Імітаційні мікромоделі відтворюють динаміку руху транспортних потоків з огляду на поведінку і умови руху кожного транспортного засобу.

Найбільш відомі представники програмного забезпечення, що реалізують цей підхід: VISSIM, AIMSUN, PARAMICS тощо.

У літературі все частіше зустрічається поняття мезомodelей, як особливого підходу до моделювання транспортних потоків. Однак визначення такого підходу досить розпливчате і не має єдиної думки в питанні, який саме математичний апарат відповідає цьому підходу. Мезоскопічні моделі розглядають одиничні транспортні засоби, але описують їх рух і взаємодію на підставі статистичних, агрегованих залежностей. Мезомodelі також можуть бути аналітичними та імітаційними.

Важливою ознакою класифікації є призначення математичних modelей транспортних потоків. Призначення, з точки зору практичного застосування і вирішення конкретних завдань, проявляється у modelей тільки у складі спеціальних програмних комплексів. Таким чином, класифікувати за призначенням представляється можливим тільки готове програмне забезпечення для моделювання транспортних потоків. З цієї позиції програмні продукти діляться на використання під час:

- попереднього планування;
- стратегічного планування (прогнозування);
- тактичного планування і управління (макро і мезо modelі);
- планування роботи окремих видів транспорту (вантажний, ГПТ, таксі тощо);
- детального аналізу руху потоків (мікро і мезомodelювання);
- оптимізації параметрів координованого світлофорного регулювання, у тому числі в АСКДР;
- розрахунку геометричних параметрів і параметрів регулювання на окремих перехрестях;
- аналізу руху пішохідних потоків;
- оцінювання рівня безпеки руху.

Варто зазначити, що останнім часом спостерігається тенденція об'єднання інструментів для вирішення декількох завдань в єдиному програмному комплексі або взаємопов'язаному сімействі продуктів одного розробника. Також з'являється багато програмних модулів поєднання різних поширених продуктів різного призначення для спрощення процесу введення і обміну даними. Таким чином, віднесення багатьох програмних продуктів до однієї з перерахованих категорій за призначенням виявляється проблематичним.

Для практичних завдань найбільш придатним є розділення на категорії за класифікаційними ознаками:

- на основі підходів моделювання (макро-, мезо-, мікро-);
- за принципом моделювання (аналітичний та імітаційний).

В такому разі мезо підхід, зважаючи на невизначеність його меж, потрібно розглядати як допоміжний і рекомендувати до застосування спільно з одним з інших підходів або як альтернативу під час окремого обґрунтування.

У таблиці А.1 наведено зведені дані щодо класифікації моделей транспортних потоків.

Таблиця А.1 — Результуюча класифікація моделей транспортних потоків

Підхід до моделювання	Клас точності	Функціональність і призначення	Продуктивність	Програмний комплекс
Макроаналітичний	низький	Прогноз перерозподілу потоків на великих мережах. Моделі стратегічного планування і тактичні моделі	дуже висока	EMME, TransCAD, VISUM, AIMSUN (v8), CUBE
Макроімітаційний	середній	Прогноз перерозподілу потоків з урахуванням фактору часу. Наближена оцінка показників якості роботи	висока	TRANSYT, SATURN, SYNCHRO, LinSig

Підхід до моделювання	Клас точності	Функціональність і призначення	Продуктивність	Програмний комплекс
		ВДМ. Залучення в контур оптимізації параметрів регулювання		
Мікроаналітичний	високий	Аналіз показників роботи окремих перехресть, невеликих ділянок магістралей	висока	SIDRA, INTERSECTION, HCS, ARCADY
Мікроімітаційний	дуже високий	Детальний аналіз показників роботи окремих перехресть, магістралей, невеликих і середніх мереж	низька	VISSIM, AIMSUN, PARAMICS, CORSIM
Мезоаналітичний	середній	Аналіз показників роботи окремих перехресть, магістралей, невеликих і середніх мереж	дуже висока	
Мезоімітаційний	високий	Аналіз показників роботи окремих перехресть, магістралей, середніх і великих мереж	середня	AIMSUN, CONTRAM, DYNAMIT-P, VISSIM

А.2 Основні принципи функціонування мікромоделей транспортних потоків

До мікромоделей транспортних потоків відносяться моделі, що описують транспортний потік на рівні окремих автомобілів або їх невеликих груп. Аналітична мікромодель представляє собою одну або кілька математичних залежностей, отриманих у результаті аналізу емпіричних даних на основі різних підходів теорії транспортних потоків або на основі теорії систем масового обслуговування. Така модель жорстко пов'язує вхідні параметри з результатами розрахунку.

Під час імітаційного моделювання динамічні процеси системи-оригіналу замінюються процесами, що з імітовані алгоритмом моделі, з дотриманням тих же співвідношень тривалостей, логічних і часових послідовностей, як і в реальній системі. Імітаційне моделювання на мікрорівні дозволяє максимально точно оцінити підсумкові показники якості роботи мережі, таких як рівень затримок, середня швидкість, кількість зупинок, рівень завантаження тощо.

На рисунку А.1 зображена спрощена схема процесу імітаційного моделювання, який складається з наступних етапів:

1. Формулювання проблеми і планування дій: розпізнавання природи завдання, визначення вимог під час пошуку її рішення.
2. Збір даних і формування моделі: отримання емпіричних даних про характеристики поведінки системи, висунення гіпотез і перетворення їх для відповідного формального уявлення.
3. Контроль адекватності моделі, тобто перевірка того, що відповіді на запитання «А що, якщо ...», адресовані моделі, можуть бути визнані правильними.
4. Експорт моделі в форму комп'ютерної програми.
5. Перевірка функціонування комп'ютерної програмної моделі.

6. Напрацювання проектних рішень щодо вирішення питань «А що, якщо ...» в формат обчислювальних експериментів. Визначення процедур вибірки даних для цілей статистичного аналізування і отримання належних відповідей на питання.

7. Проведення імітаційних комп'ютерних експериментів і аналізування результатів.

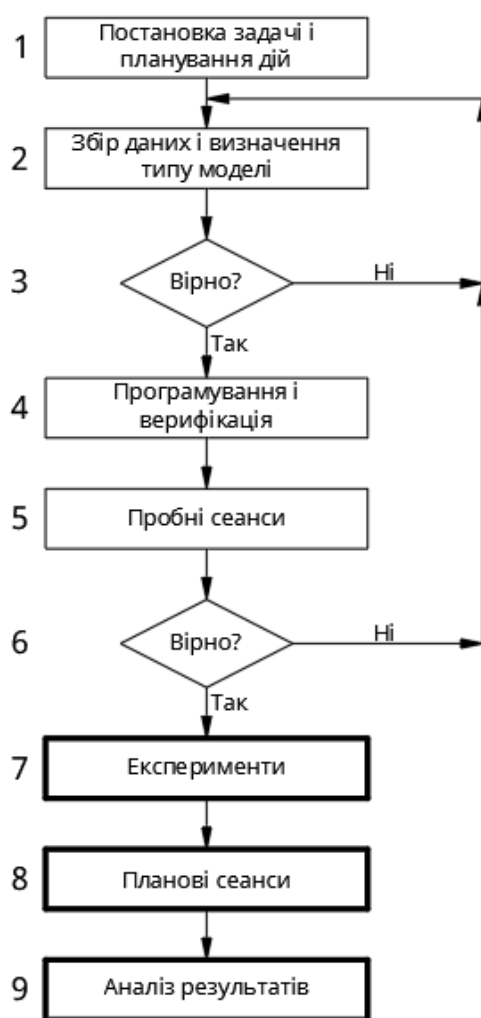


Рисунок А1 — Узагальнена діаграма процесу імітаційного моделювання

Основою імітаційної мікромоделі дорожнього руху є набір субмоделей, які описують певні аспекти поведінки водіїв. До них відносяться: модель проходження за лідером, модель зміни смуг, модель вибору безпечного інтервалу в потоці, модель вибору швидкості, модель злиття з потоком, модель обгонів.

Структуру імітаційної мікромоделі можна характеризувати через взаємодію елементів водій-автомобіль-дорога-середовище.

Водій. Даний елемент системи містить вищеописані моделі поведінки під час руху в потоці (проходження за лідером, зміни смуги, вибору безпечного інтервалу в потоці тощо), а також враховуються притаманні водію час реакції, бажана швидкість руху, ступінь дотримання обмеження швидкісного режиму й інші поведінкові характеристики.

Автомобіль. Елемент “автомобіль” описується в основному фізичними габаритами (довжина і ширина), тягово-швидкісними характеристиками, приналежністю до якого-небудь класу, пасажиромісткістю та вантажопідйомністю тощо.

Дорога. У рамках даного елемента системи описуються всі параметри інфраструктури, організації та управління рухом. Сюди входять геометричні параметри ВДМ (кількість і ширина смуг, радіуси поворотів, ухили тощо), параметри ОДР (напрямки руху смугами, заборона маневрів, обмеження швидкості, виділені смуги тощо), параметри управління (режими світлофорного регулювання, параметри роботи АСКДР та ІТС).

Середовище. У поняття середовища в імітаційному моделюванні входить вплив на транспортні потоки погодних умов у частині обмеження видимості і зниження якості зчеплення колеса з покриттям. Ці чинники призводять до зниження швидкості руху і збільшення дистанції між автомобілями.

Таким чином, програмні комплекси мікромоделювання імітують рух транспортних потоків на рівні взаємодії елементів системи. Це дозволяє максимально точно оцінити підсумкові показники якості роботи ділянок дорожньої мережі.

У сучасних програмних комплексах для мікромоделювання транспортних потоків у стандартній комплектації, як правило, є можливість вибору декількох різновидів моделей, а також можливість завантаження користувачем будь-якої іншої моделі.

У процесі імітації функціонування досліджуваної системи, як під час проведення експерименту з самим оригіналом, фіксуються певні події і стани, за якими потім обчислюються необхідні характеристики якості функціонування досліджуваної системи (рівень затримок, середня швидкість, кількість зупинок, рівень завантаження тощо). Кожен експеримент з моделлю має в основі якесь випадкове число, що визначає подальший розвиток подій в моделі. Статистично достовірні результати можуть бути отримані тільки шляхом усереднення результатів за декількома ітераціями (прогонами) моделі. Кількість прогонів визначається відповідно до положень теорії планування експерименту.

Субмоделі, що використовуються в програмних комплексах мікромоделювання, мають ряд параметрів, які можуть бути змінені для більш точного відтворення місцевих особливостей руху потоків у процесі калібрування моделі. Кількість таких параметрів у програмних комплексах досягає декількох десятків і кожен з них має певний вплив на результат моделювання. Вибір того чи іншого значення кожного параметра вимагає наявності глибокого розуміння теоретичної і математичної бази програмного продукту, що використовується. У зв'язку з цим, метод імітаційного макромоделювання, а особливо етап калібрування моделі, висувають найвищі вимоги до рівня кваліфікації фахівців.

А.3 Основні принципи функціонування макромоделей транспортних потоків

Сферою використання макромоделей, в основному, є стратегічне і тактичне планування розвитку транспортної системи та оцінювання масштабних проєктів, що впливають на рух транспортних потоків на значній території. Ключове завдання моделювання на такому рівні — розрахунок змін попиту за видами транспорту, за часом здійснення поїздки і за маршрутами руху. Для первісного оцінювання попиту використовуються моделі формування транспортного попиту. На основі функціонального аналізу території, соціально-економічних даних і поведінкових характеристик населення такі моделі дозволяють оцінювати параметри транспортного попиту і представити його у вигляді матриць кореспонденцій з розподілом за цілями поїздок, категоріями користувачів і часом здійснення поїздок. Процес розрахунку транспортного попиту і результуючих потоків за мережею історично склався в послідовність дій, яка отримала назву «класична 4 - крокова модель» (рисунк. А.2). Основою побудови моделі є розподіл території моделювання на транспортні райони, які є головними з точки зору функціональної ролі і транспортної доступності. Другою, не менш важливою складовою, є модель транспортного пропозиції — набір графів наявних транспортних і маршрутних мереж з усіма притаманними їм атрибутами (довжина, пропускна здатність, дозволена швидкість, наявність регулювання, зупинки маршрутного та громадського транспорту, парковки тощо).



Рисунок А.2 — Структура класичної 4 - крокової транспортної моделі

Модель транспортної пропозиції дає уявлення про можливості існуючої транспортної інфраструктури досліджуваної території з необхідним ступенем точності. У такому разі вимоги до ступеня деталізації даних про транспортну пропозицію визначаються власне об'єктом транспортного моделювання і конкретним колом завдань, для вирішення яких розробляється транспортна модель.

На виході модель транспортної пропозиції формує первинні матриці затрат — таблиці, що містять узагальнене оцінювання різного роду витрат на переміщення між кожною парою транспортних районів у вільних умовах.

На етапі генерації поїздок (крок 1) проводиться оцінювання сумарних обсягів прибуття і відправлень у кожному транспортному районі.

Оцінювання обсягів прибуття і відправлень проводяться окремо за кожною ціллю (шару) переміщень на основі наступних даних:

- про просторове розміщення населення і інших об'єктів утворення і відстань переміщень, що відносяться до певної цілі;
- про рухомість населення, тобто середня кількість поїздок з відповідною ціллю, що здійснюються протягом доби.

Для оцінювання обсягів прибуття і відправлень можуть використовуватися різні методи, такі як:

- регресійні моделі;
- перехресна класифікація;
- моделі дискретного вибору.

На виході кроку 1 отримуємо заготовки матриць кореспонденцій, у яких сумарний стовпець і рядок заповнені значеннями загальної кількості відправлень і прибуття за кожним районом.

На етапі розподілу поїздок за районами (крок 2) відбувається розрахунок значень у всіх інших комірках матриць кореспонденцій, тобто кількості поїздок між кожною парою районів відправлення/прибуття. З математичної точки зору завдання розподілу загальної кількості поїздок, що генеруються в кожному районі, за іншим районам з дотриманням балансу сумарних значень відправлень і прибуття має нескінченне число рішень. Для отримання результатів, які відображають реальну ситуацію, необхідно враховувати дані обстежень транспортної поведінки і фактичних потоків, а також використовувати спеціальні методи розрахунку за допомогою матриць.

Етап розрахунку матриць кореспонденцій є найбільш важливим з точки зору достовірності кінцевих результатів моделювання. Незважаючи на те, що сучасні програмні комплекси, як правило, мають зручні вбудовані засоби розрахунку матриць кореспонденцій, для їх правильного використання необхідно мати розуміння теоретичних положень, які викладені в спеціальній літературі.

Таким чином, на виході кроку 2 мають бути отримані матриці кореспонденцій для кожного шару переміщень з розбивкою за часом доби (за необхідності).

На етапі розподілу поїздок за видами транспорту (крок 3) відбувається оцінювання того, які види транспорту (способи поїздки) будуть використовуватися для реалізації отриманих на попередньому кроці міжрайонних кореспонденцій. На вибір способу здійснення поїздки впливають як об'єктивні параметри самої поїздки, так і суб'єктивні відчуття конкретного користувача. Чинники, що впливають на вибір користувачем способу поїздки, діляться на 3 групи:

- характеристики даного виду транспорту (в першу чергу швидкість сполучення, надійність дотримання графіку руху, дальність пішохідних підходів, тривалість очікування, пов'язаного з необхідністю пересадки, вартість поїздки, а також рівень комфорту, безпека, можливість телефонних розмов під час поїздки, доступ до Internet тощо);

- соціально-економічний статус користувача (наявність особистого автомобіля, рівень доходу, склад сім'ї, ділові або соціальні завдання, що вимагають автомобіля до, після або в робочий час тощо);

- характеристики поїздки (ціль поїздки, час її виконання, наявність парковки і її вартість у пункті призначення, наявність попутників і їх кількість тощо).

Розподіл міжрайонних кореспонденцій за доступними видами транспорту здійснюється на основі емпірично отриманих залежностей або за допомогою моделей, заснованих на імовірнісному дискретно виборі. Як критерій вибору використовується максимізація корисності для користувача або мінімізація його витрат.

На етапі розподілу поїздок за маршрутами (крок 4) оцінюється навантаження на транспортну мережу. Кореспонденції, які за розрахунками будуть реалізовані на індивідуальному автомобільному транспорті, розподіляються за можливими маршрутами слідування.

Аналогічно проводяться розрахунки обсягу і маршрутів руху вантажних кореспонденцій. Маршрутні транспортні засоби не беруть участі в розподілі і приймаються як фонові потоки.

У результаті розрахунку розподілу поїздок за маршрутами з'являються нові значення часу проїзду між транспортними районами, що може істотно вплинути на розподіл поїздок за районами. Для врахування можливих змін необхідно провести кілька ітерацій розрахунку, починаючи з другого кроку описаної процедури.

ДОДАТОК Б

(довідковий)

ПРИКЛАД АНКЕТИ ДЛЯ ПРИДОРОЖНЬОГО ОПИТУВАННЯ

АНКЕТА придорожного опитування про структуру переміщень № опитувального листа						
ПІБ інтерв'юера	Підпис	№ точки опитування	Розташування опитування	Напрямок руху	Дата	Точний час опитування водія
					___/___/___	___г___ хв
№	Питання					
1	Визначте групу ТЗ (заповнюється інтерв'юером)					
	1. Мотоцикли, мотоцикли з коляскою		2. Легкові, легкові з причепом		3. Мікроавтобуси, пікапи, легкові з причепом вище 2 м (фургон, великогабаритний вантаж)	
	4. Легкові вантажні загальною вагою до 3,5 т вантажопідйомністю до 2 т з 2 осями		5. Середні вантажні з загальною вагою до 12 т та вантажопідйомністю до 8 т з 2 осями		6. Середні вантажні загальною вагою вище 12 т та вантажопідйомністю вище 8 т з 2 осями	
	7. Автобуси з 2 осями		8. Автобуси з 3 осями		9. Важкі вантажні загальною вагою вище 12 т і вантажопідйомністю вище 14 т з 3 і більше осями	
	10. Автопоїзда на базі тягача		11. Автопоїзда на базі 2- основного шасі з надбудовою		12. Автопоїзда на базі 3 (і більше) — основного шасі з надбудовою	
2	Скільки пасажирів їде разом з Вами? (крім вантажних ТЗ)					
	Яка мета Вашої поїздки? (Лише для легкових)					
	Приватна		Ділова			

	1. З роботи/на роботу	2. З особистої потреби	3. По роботі	4. Везу пасажирів	5. Везу вантаж	6. Інше _____
6	Назвіть місце в'їзду на трасу М-23					
7	Назвіть місце виїзду з траси М-23					
9	Скільки поїздок в одному напрямку в місяць Ви здійснюєте даною ділянкою дороги М-23?					
	1. Менше 1		2. 1- 4		3. 5-10	
	4. 10-20		5. 20-30		6. Більше 30	
Увага!!!! Під час проведення придорожніх опитувань співробітник зобов'язаний проводити опитування водіїв ТЗ у частках, що відповідають структурі транспортного потоку в даній точці, включаючи іноземні ТЗ.						

ДОДАТОК В
(довідковий)
**ПРИКЛАД ОЦІНЮВАННЯ ЁМНОСТІ РАЙОНІВ ЗА ОБСЯГОМ
ВІДПРАВЛЕНЬ**

Розглянемо шар переміщень «Дім-Робота». В якості оцінювання ёмності районів за обсягом відправлень візьмемо чисельність населення, за обсягом прибуття — кількість робочих місць.

Таким чином, вихідними даними розрахунку є характеристики розрахункових районів:

R — кількість транспортних районів;

p_i — чисельність населення в i -му районі;

w_i — кількість робочих місць в i -му районі, де $i = 1, \dots, R$;

k — коефіцієнт рухомості, тобто середня кількість поїздок на роботу протягом доби.

$P = \sum_i(p_i)$ — сумарна чисельність населення в системі;

$W = \sum_i(w_i)$ — сумарна кількість робочих місць у системі.

Вихідні показники для розрахунку:

M — загальна кількість переміщень для шару «Дім-Робота»;

O_i — обсяг відправлень в i -му районі;

D_i — кількість прибуття в i -му районі, де $i = 1, \dots, R$. Вихідні показники розраховуються за формулою:

$$M = P \cdot k,$$
$$O_i = M \cdot p_i / P, \quad D_i = M \cdot w_i / W.$$

Примітка 1. Вживається також термінологія, в рамках якої коефіцієнт $A = M / P$ називається коефіцієнтом утворення, а $B = M / W$ — коефіцієнтом притягнення для шару «Дім-Робота».

Примітка 2. При наявності відповідних даних соціологічних опитувань у моделі може враховуватися відмінність у рухомості населення в різних районах. У цьому випадку значення $k = k_i$ можуть задаватися індивідуально для кожного району або застосовуватися класифікація районів за характером значення рухомості.