

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТУ  
КАФЕДРА АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

до випускної роботи бакалавра

на тему: *Підвищення ефективності використання рухомого складу громадського транспорту м. Кривий Ріг за рахунок впровадження алгоритмів міжмаршрутної взаємозамінності у розкладах руху*

Виконала:

студентка 4 курсу, групи ТТ-22 \_\_\_\_\_ К.С. Мохорт

(шифр групи)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент \_\_\_\_\_

В.О. Сістук

(науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри:

д.т.н., професор \_\_\_\_\_

Ю.А. Монастирський

(науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Кривий Ріг – 2026 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТУ  
КАФЕДРА АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський) рівень вищої освіти

Галузь знань: J – «Транспорт та послуги»

Спеціальність: J8 – «Автомобільний транспорт»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри  
автомобільного транспорту

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
” \_\_\_\_\_ 2026 р. /

## ЗАВДАННЯ

### НА ВИПУСКНУ РОБОТУ СТУДЕНТА

***Мохорт Карині Сергіївні***

1. Тема: *Дослідження методів перерозподілу транспортних потоків у житловій забудові м. Кривий Ріг шляхом впровадження територіальних обмежень*  
керівник проекту Сістук В.О., к.т.н., доцент  
затверджені наказом університету № в191с від 07.04.2026.
2. Строк подання студентом роботи для перевірки на плагіат до 10.06.2026
3. Вихідні дані до роботи: Керівництво до програми VISUM, транспортна модель м. Кривий Ріг
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Математичний апарат моделювання. 2. Моделювання та оптимізація. 3. Аналіз сценаріїв моделювання. Оформлення пояснювальної записки і презентації.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
Графіки та діаграми по результатам досліджень у вигляді презентації в програмі Microsoft Office Power Point..
6. Дата видачі завдання 07.04.2026 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
1	Математичний апарат моделювання маршрутних блоків	07.04-12.04	
2	Моделювання та оптимізація	12.04 – 04.05	
3	Аналіз сценаріїв моделювання	04.05 – 10.05	
4	Оформлення пояснювальної записки і презентації	10.05 – 25.05	

Студент

К.С. Мохорт

Керівник

В.О. Сістук

## РЕФЕРАТ

Робота викладена на напрямках інтеграції методів дослідження операцій та сучасних геоінформаційних платформ транспортного макромодельовання. Містить декілька сценаріїв розрахунку, ілюстрована таблицями та діаграмами Ганта.

У роботі розроблено та реалізовано п'ять альтернативних прогностичних сценаріїв лінійного блокування громадського транспорту для маршрутної мережі пасажирського транспорту м. Кривий Ріг. Досліджено вплив технологічних обмежень («лінійної чистоти», збереження оператора, ідентичності систем транспорту та введення вартісних штрафних коефіцієнтів) на ефективність використання рухомого складу.

Доведено, що впровадження міжмаршрутного обміну є найбільш раціональним для умов Кривого Рогу, враховуючу прив'язку до перевізника та транспортної системи при одночасному штрафуванні холостого ходу. Реалізація даного сценарію забезпечує скорочення необхідного парку рухомого складу на 22,8% (з 612 до 472 одиниць ТЗ) за рахунок ліквідації невиробничих простоїв на кінцевих пунктах; зниження сумарного часу холостих пробігів у мережі на 41,4% (до 609 год 45 хв), що мінімізує витрати енергоресурсів в умовах наддовгих маршрутних відстаней;

**Ключові слова:** лінійне блокування, міжмаршрутний обмін, PTV Visum, потік мінімальної вартості, транспортне моделювання, холостий пробіг, діаграма Ганта, Кривий Ріг.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	5
РОЗДІЛ 1. МАТЕМАТИЧНИЙ АПАРАТ ТА ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ЗАСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ ГРАФІКІВ РОБОТИ РУХОМОГО СКЛАДУ .....	8
1.1. Цілі та особливості оптимізації графіків руху громадського транспорту .....	8
1.2. Особливості моделювання графіків громадського транспортного транспорту .....	23
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ МІЖМАРШРУТНОЇ ВЗАЄМОЗАМІННОСТІ У РОЗКЛАДАХ РУХУ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ .....	28
2.1. Підготовчий етап та налаштування базової моделі.....	28
2.2. Сценарій 1: Оптимізація за критерієм мінімізації кількості рухомого складу .....	28
2.3. Сценарій 2: Оптимізація за критерієм мінімізації нульових пробігів.....	31
2.4. Сценарій 3: Оптимізація за кількістю ТЗ в умовах допущення міжрейсових переходів.....	32
2.5. Сценарій 4: Оптимізація за часом нульових пробігів в умовах допущення міжмаршрутних переходів.....	33
2.6. Сценарій 5: Оптимізація із прив'язкою до перевізника та транспортної системи.....	34
2.7. Висновки до розділу 2 .....	35
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МІЖМАРШРУТНОЇ ВЗАЄМОЗАМІННОСТІ У РОЗКЛАДАХ РУХУ.....	36
3.1. Сценарій 1 .....	36
3.2. Сценарій 2 .....	36
3.3. Сценарій 3 .....	37
3.4. Сценарій 4 .....	38
3.5. Сценарій 5 .....	38
3.6. Графічна візуалізація результатів .....	39
ВИСНОВКИ.....	41
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	43

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Актуальність застосування математичного апарату теорії графів та методів дослідження операцій для оптимізації графіків роботи рухомого складу (лінійного блокування) у Кривому Розі зумовлена унікальними просторовими, інфраструктурними та соціально-економічними характеристиками міста. Кривий Ріг є однією з найдовших урбанізованих агломерацій у Європі (понад 120 км), що створює екстремальні умови для функціонування міського пасажирського транспорту (МПТ) та вимагає специфічних підходів до його моделювання.

Значна географічна децентралізація та значна відстань між наявними депо (автобусними парками, тролейбусними та трамвайними депо) і початковими точками маршрутів генерує великі обсяги холостих перегонів рухомого складу під час виїзду на лінію та повернення зі зміни. Мінімізація сумарного часу холостих пробігів має пряме прикладне значення для Кривого Рогу, оскільки дозволяє скоротити невиробничі витрати палива та електроенергії, які в умовах наддовгих відстаней суттєво обтяжують бюджет транспортних підприємств.

Сьогодні на ринку пасажирських перевезень міста одночасно функціонують комунальні підприємства (що оперують великогабаритними автобусами, тролейбусами, трамваями та унікальною системою швидкісного трамвая) та приватні ліцензіати (переважно автобуси малого та середнього класів М2 і М3). Моделювання графіків із накладанням диференційованих обмежень — від вільного міжмаршрутного обміну до жорсткого підпорядкування конкретному оператору дає змогу отримати цифрову оцінку ефективності поточної багатооператорної структури перевезень та оцінити потенціал переходу до єдиного муніципального простору управління.

**Мета і задачі дослідження.** Підвищення ефективності функціонування міського пасажирського транспорту (на прикладі м. Кривого Рогу) шляхом розробки, багатосценарного моделювання та обґрунтування раціональних

параметрів лінійного блокування рухомого складу на основі суміщення систем транспорту та міжмаршрутного обміну.

Для досягнення поставленої мети визначено такі задачі:

1. Проаналізувати математичні підходи до оптимізації графіків роботи рухомого складу й організації міжмаршрутної взаємозамінності громадського транспорту.

2. Сформувати розрахунковий математичний граф та параметризувати цільову функцію витрат мережевого потоку мінімальної вартості для умов пасажирської мережі м. Кривого Рогу.

3. Розробити та реалізувати в середовищі *PTV Visum* багатосценарний комплекс прогностичних моделей лінійного блокування (із диференціацією за критеріями «лінійної чистоти», мінімізації парку ТЗ, обмеження операторів та систем транспорту).

4. Провести кількісну оцінку та порівняльний аналіз техніко-експлуатаційних показників сформованих сценаріїв (потреба в рухомому складі, тривалість пасажирських рейсів, обсяги холостих пробігів та міжрейсових відстоїв).

5. Визначити оптимально-раціональний сценарій, що мінімізує системні витрати ресурсу в умовах просторової децентралізації міста.

**Об'єкт дослідження.** Процес формування графіків роботи рухомого складу (лінійних блоків) та організації технологічних зв'язків між суміжними рейсами в межах пасажирської транспортної мережі надпротяжного міста.

**Предмет дослідження.** Закономірності зміни техніко-експлуатаційних показників роботи пасажирського транспорту (потреби в парку ТЗ, тривалості холостих рейсів та відстоїв) залежно від накладання просторово-часових, технологічних та організаційних обмежень при лінійному блокуванні в умовах міжмаршрутного обміну.

**Методи дослідження.** Методи дослідження операцій та теорії графів, методи декомпозиції, транспортне макромодельовання, системний та порівняльний аналіз.

**Практичне значення одержаних результатів** - в оптимізації добового випуску пасажирського транспорту м. Кривого Рогу за рахунок впровадження

раціонального сценарію лінійного блокування, що забезпечує скорочення необхідного парку рухомого складу на 22,8% (з 612 до 472 одиниць ТЗ) порівняно з базовим рівнем шляхом ліквідації невикористаних простоїв, зниження сумарного часу холостих пробігів у мережі на 41,4% (до 609 год 45 хв), що мінімізує витрати енергоресурсів в умовах над протяжної агломерації, надання міській адміністрації аргументів щодо доцільності централізації ринку перевезень. Створений метод параметризації лінійних блоків у PTV Visum може бути використаний для перспективного планування інших систем транспорту міста.

**Структура і обсяг роботи.** Бакалаврська робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 10 джерел. Загальний обсяг роботи – 43с.

## РОЗДІЛ 1. МАТЕМАТИЧНИЙ АПАРАТ ТА ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ЗАСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ ГРАФІКІВ РОБОТИ РУХОМОГО СКЛАДУ

### 1.1. Цілі та особливості оптимізації графіків руху громадського транспорту

Цільовою функцією оптимізації графіків руху транспортних засобів (ТЗ) громадського транспорту (ГТ) (лінійного блокування) є визначення оптимальної кількості транспортних засобів (ТЗ), необхідної для забезпечення заданого розкладу руху, з одночасною мінімізацією сукупних експлуатаційних витрат. Розрахунок лінійного блокування реалізовано у двох конфігураціях: із взаємозамінністю транспортних засобів та без неї.

*Лінійне блокування без взаємозамінності ТЗ* передбачає жорстке закріплення заздалегідь визначеного типу або комбінації рухомого складу.

*Лінійне блокування із взаємозамінністю ТЗ* дозволяє динамічно обирати найбільш раціональний тип рухомого складу для кожного окремого елементарного напіврейсу (секції рейсу) із переліку, заданого в атрибуті «*Набір комбінацій транспортних засобів*» (*Vehicle combination set*). Критерієм оптимізації в цьому випадку виступає відповідність місткості ТЗ наявному пасажиропотоку (попиту).

Додатковим завданням моделювання є виявлення потенціалу оптимізації та скорочення витрат у чинному розкладі руху.

В основі математичного апарату, що забезпечує розв'язання задачі лінійного блокування (оптимізації графіків роботи рухомого складу), покладено концепцію формування та декомпозиції транспортної задачі про потік мінімальної вартості у графі (потіку в мережах).

Процес розрахунку та моделювання було реалізовано за допомогою наступної послідовності алгоритмічних кроків:

#### 1. Декомпозиція вихідної задачі.

На початковому етапі здійснено розщеплення глобальної розмірної задачі на систему взаємозалежних підзадач меншої складності. Критерієм поділу (партиціонування) виступили просторово-часові та технологічні обмеження транспортної мережі, що дозволило суттєво знизити загальну обчислювальну місткість розрахунку та забезпечити паралелізацію обчислень.

Фундаментальний принцип декомпозиції: до однієї партії відносять усі секції рейсів, яким призначено ідентичну комбінацію транспортних засобів.

Такий розподіл є математично обґрунтованим, оскільки один сформований блок (графік зміни) завжди обслуговується суворо однією комбінацією ТЗ, що унеможлиблює зміну типу рухомого складу всередині одного блока. Секції рейсів, які не мають закріпленої комбінації ТЗ, сукупно утворюють окрему самостійну частину. Для кожної з утворених частин усі подальші розрахункові кроки (побудова індивідуального графа, пошук потоку мінімальної вартості та декомпозиція результатів на блоки) виконуються ізольовано.

*Поглиблене розділення за технологічними ознаками.*

Як додаткову опцію в параметрах процедури PTV Visum реалізовано можливість глибшого розділення задач маршрутного (лінійного) блокування за такими критеріями:

1. *Оператор (перевізник);*
2. *Система транспорту;*
3. *Маршрут (лінія)*

Якщо в налаштуваннях задано обов'язкову умову збереження оператора для наступного рейсу рухомого складу, алгоритм застосовує додаткове розщеплення матриці задач за операторами. У такому випадку кожна часткова підзадача (і відповідно кожен результуючий блок) міститиме виключно ті секції рейсів, які належать до однієї фіксованої комбінації ТЗ та одного конкретного оператора. Це повністю унеможлиблює зміну перевізника всередині робочої зміни ТЗ. У межах

розрахунку для кожного унікального поєднання «Комбінація ТЗ - Оператор» автоматично формується окремий граф.

## *2. Побудова математичного графа моделі.*

В основі алгоритму розрахунку лінійного блокування покладено математичний апарат теорії графів. Процедура апроксимує розклад руху транспортної системи у вигляді мережевої оптимізаційної моделі потоку мінімальної вартості.

Математичний граф задачі лінійного блокування складається з двох фундаментальних множин: вершин (вузлів), які фіксують просторово-часові події, та спрямованих дуг (ребер), що описують технологічні зв'язки та операції.

### *1. Системні вершини (Вузли графа).*

Кожна окрема секція рейсу (напіврейс) або дискретна дія у просторі й часі відображається в топології графа за допомогою двох базових вершин:

- *Початкова вершина (Старт):* Фіксує географічну точку (зупинку, депо) та точний час початку виконання рейсів або підготовчих робіт.
- *Кінцева вершина (Фініш):* Фіксує точку та час завершення відповідного рейсу або технологічної операції.

Додатково в структуру графа інтегруються *глобальні джерела (інжектори) та стоки потоку*, які математично моделюють депо або операційні бази як початкові точки виходу рухомого складу на маршрутну мережу та кінцеві точки повернення ТЗ після зміни.

### *2. Системні дуги (Редра графа) та їх класифікація.*

Дуги в графі мають строго визначену спрямованість, яка відображає хронологічну послідовність виконання операцій у часі (вектор часу). Вони поділяються на такі категорії:

- *Дуги рейсів.* Спрямовані ребра, що безпосередньо з'єднують початкову та кінцеву вершини одного й того самого напіврейсу. Пропускна спроможність

таких дуг жорстко детермінована (потік дорівнює одиниці, якщо рейс має бути виконаний).

- *Дуги технологічних переходів* . Сполучні ребра, які зв'язують кінцеву вершину попереднього рейсу з початковою вершиною наступного потенційного рейсу. Вони моделюють:
  - Міжрейсові відстої на кінцевих пунктах у разі послідовного обслуговування рейсів одного маршруту.
  - Порожні (нульові) пробіги — переміщення ТЗ у просторі без пасажирів, якщо наступний рейс розпочинається з іншого кінцевого пункту або належить іншому маршруту (в умовах допущення міжлінійного обміну).
  - *Дуги депо (Depot Arcs)*: Ребра, які пов'язують глобальні джерела/стоки графа з початковими/кінцевими вершинами рейсів. Вони описують виїзд рухомого складу з місць постійної дислокації на мережу на початку зміни та повернення в депо після її завершення.

Для кожного моменту відправлення та прибуття в межах секції пасажирського рейсу (або послідовності секцій рейсів, пов'язаних ланцюжками примусового зчеплення) додається вузол графа, після чого обидва вузли з'єднуються дугою. Нижче ці вузли класифікуються як «реальні події». При цьому під відправленням та прибуттям у кожному випадку мається на увазі часова відмітка з урахуванням тривалості підготовчо-заклучних операцій (передрейсового та післярейсового часу), якщо вони активовані в параметрах моделювання.

Для кожного депо, дозволеного для використання поточною комбінацією транспортних засобів, а також для кожного зупиночного пункту, що є початком секції пасажирського рейсу в межах поточної декомпозиції (включаючи порожні пробіги між зупиночними пунктами), вноситься подія прибуття для відповідного моменту часу, а також додається дуга порожнього рейсу, яка з'єднує подію відправлення цього рейсу з подією прибуття на зупиночний пункт або в депо (у такий спосіб формуються так звані «нереальні» або «фіктивні» події прибуття.

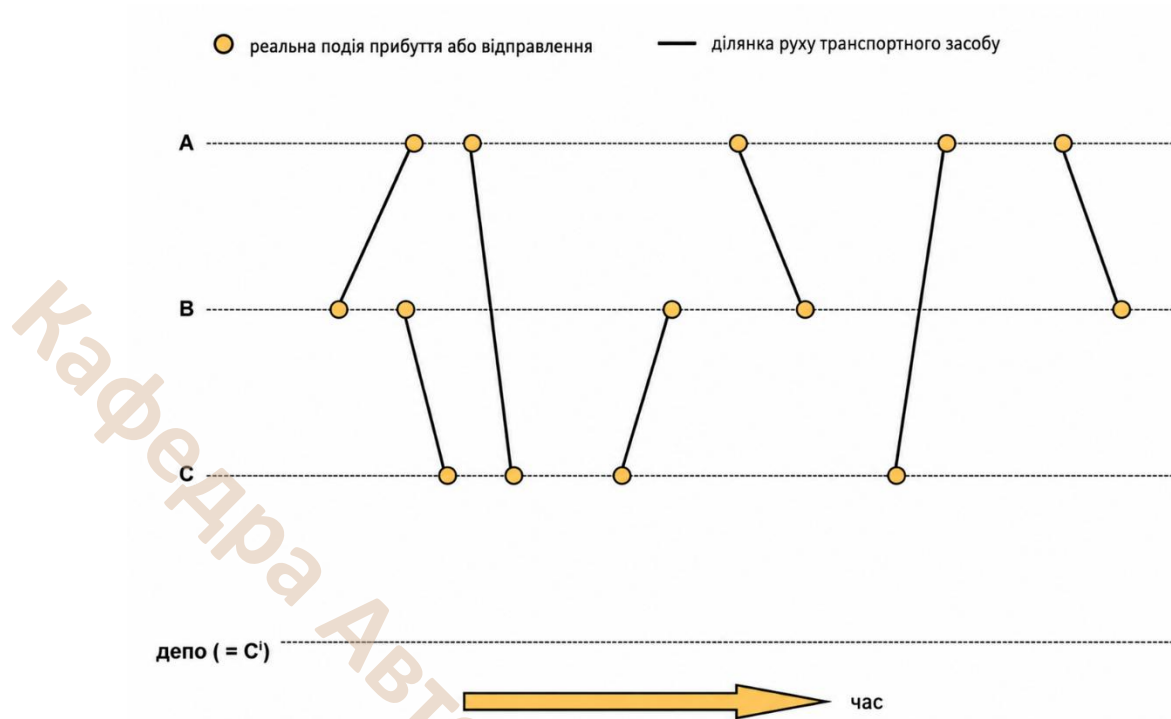


Рис.1.1. Етап інтеграції вершин та дуг, що моделюють секції пасажирських рейсів

Таким чином, депо розглядаються як спеціальні зупиночні пункти. У структурі графа події на звичайних зупиночних пунктах та в депо чітко розмежовуються: це означає, що в топології графа створюється одна окрема вершина для пункту зупинки і ще одна — для депо, навіть якщо в реальній транспортній мережі моделі депо територіально прив'язане до цього самого зупиночного пункту.

Аналогічним чином у структуру графа вноситься подія відправлення та відповідна дуга, що веде від неї до події відправлення пасажирського рейсу. Проте ця операція виконується виключно для кожного депо, дозволеного для використання даною комбінацією транспортних засобів, і не застосовується до звичайних зупиночних пунктів. Зазначені елементи моделюють процес виїзду рухомого складу з місць постійної дислокації (нульові рейси з депо), у результаті чого в графі формуються так звані «фіктивні» події відправлення.

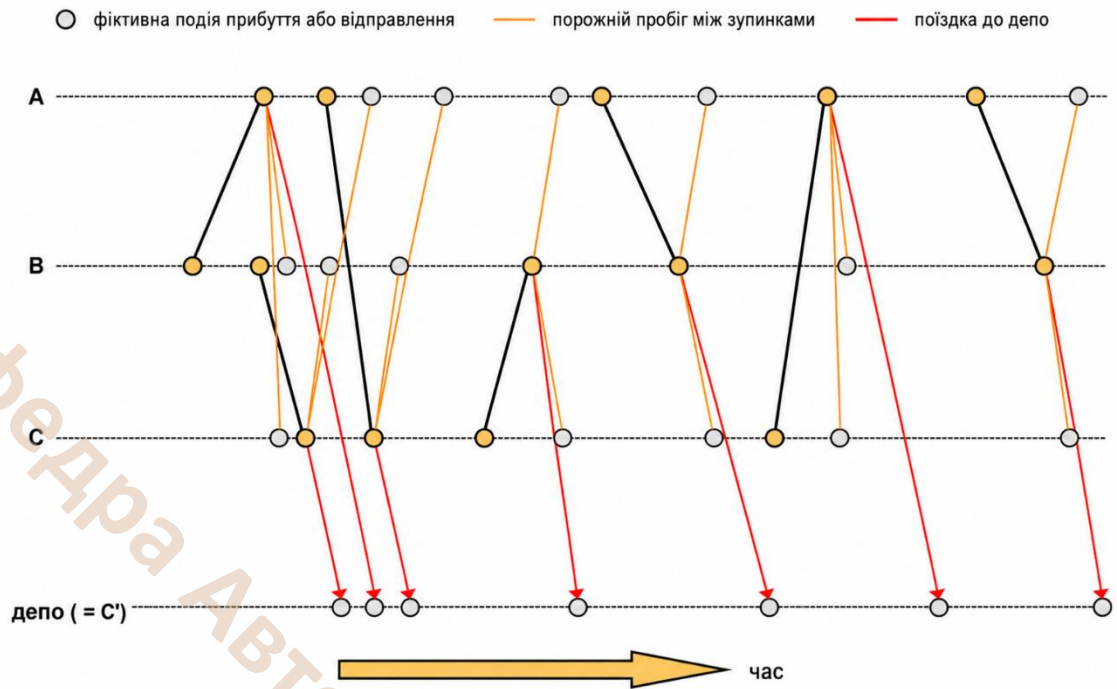


Рис.1.2. Етап інтеграції сполучних дуг, що моделюють заїзд рухомого складу в депо та виконання нульових пробігів між пасажирськими зупинками

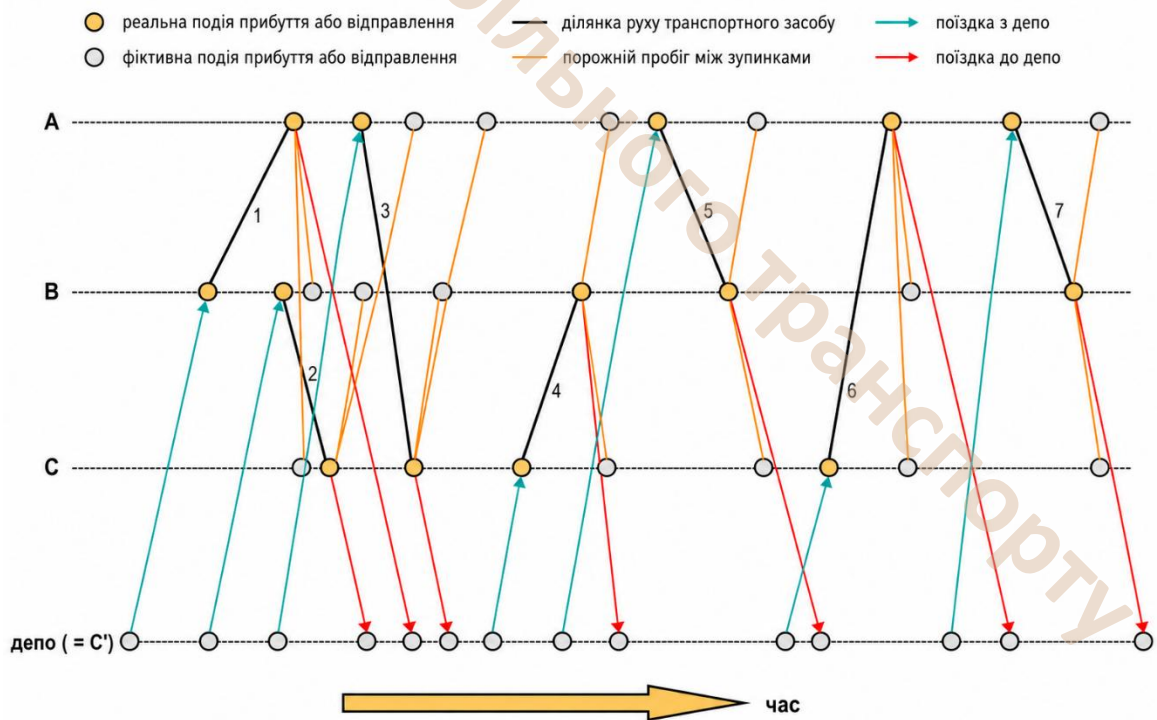


Рис.1.3. Етап інтеграції сполучних дуг, що моделюють випуск (виїзд) рухомого складу з депо на маршрутну мережу

На даному етапі здійснюється спрощення топологічної структури графа шляхом агрегування (об'єднання) вершин з ідентичними параметрами просторово-часової доступності, а також видалення дубльованих (еквівалентних) дуг порожніх рейсів, які забезпечують доступ до одного й того самого моменту відправлення. Стан графа після виконання процедури редукції (скорочення) кількості дуг наведено на рис. 1.4.

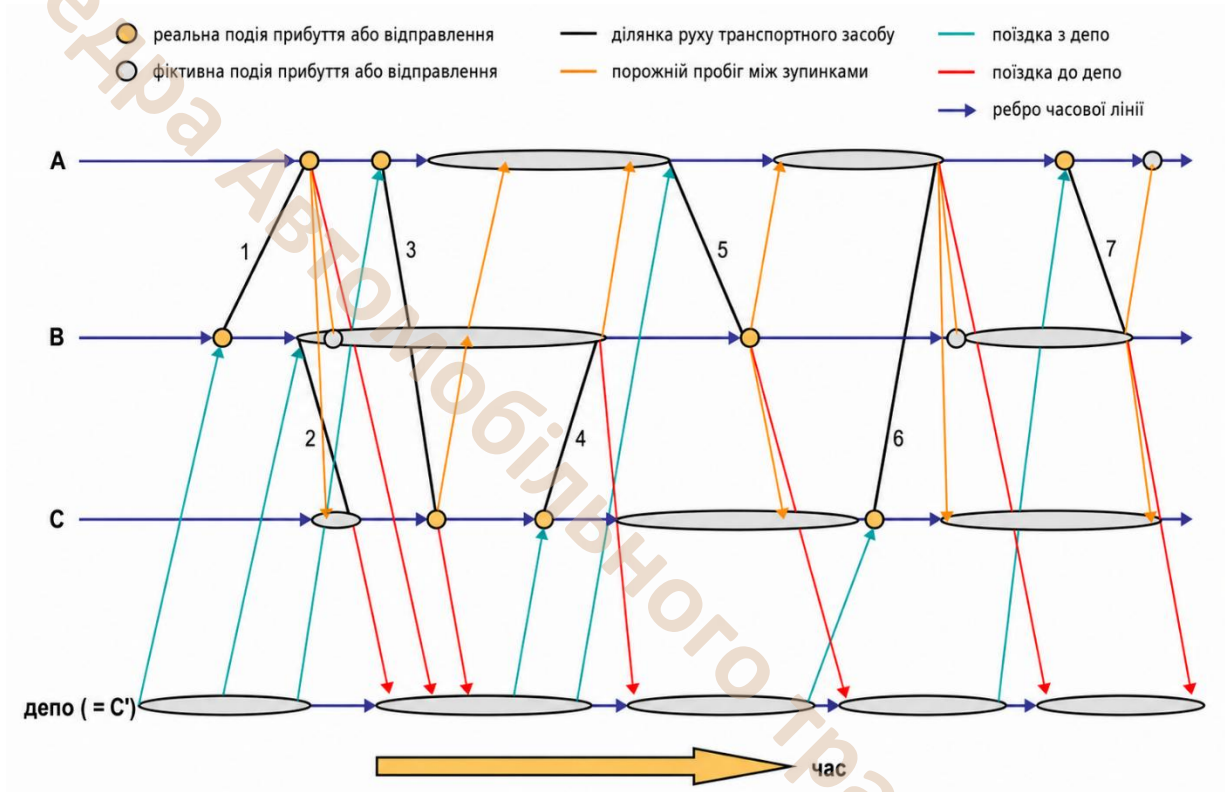


Рис.1.4. Топологічна структура графа потоку після інтеграції хронологічних дуг часу та виконання процедури редукції еквівалентних ребер

Кожній дузі технологічного переходу та дузі депо в графі присвоюється ваговий коефіцієнт — *математична вартість дуги*. Вартість дуги розраховується автоматично на основі заданої цільової функції та комерційних параметрів моделі.

Для формалізації лінійного блокування як класичної задачі мережевого потоку необхідно визначити нижню та верхню границі пропускної спроможності для

кожної дуги графа. Дані параметри задають мінімальну та максимальну кількість транспортних засобів (одиниць потоку), які можуть одночасно проходити через відповідну дугу.

У моделі застосовуються такі математичні правила та обмеження:

*Нижня границя пропускної спроможності:*

- Для дуг рейсів нижня границя строго дорівнює **1**, оскільки виконання кожного запланованого розкладом пасажирського рейсу є обов'язковим:
- Для всіх інших типів дуг (зокрема для нульових рейсів та хронологічних дуг очікування) нижня границя дорівнює **0**, оскільки їх використання не є обов'язковим для функціонування системи.

*Верхня границя пропускної спроможності:*

- Для дуг пасажирських рейсів верхня границя також строго дорівнює **1**, оскільки кожна планова секція рейсу має бути виконана рівно один раз і не більше;
- Для дуг порожніх рейсів верхньою границею пропускної спроможності є кількість нульових рейсів, які вони репрезентують (це значення стає більшим за 1 лише в тому випадку, якщо в межах процедури редукції дуг декілька паралельних ребер було об'єднано в одне).

Для ідентифікації економічно ефективного потоку на фінальному етапі здійснюється вартісна оцінка дуг графа. Зазначені параметри описуються функцією витрат, що є аналогічною до концепції розрахунку часу поїздки, що сприймається, яка застосовується в процедурах розподілу пасажиропотоків на мережі громадського транспорту. Математична структура даної функції витрат представлена у вигляді лінійної комбінації (адитивної суми) доданків, кожен з яких є добутком певного фізичного або технологічного параметра дуги (тобто характеристики модельованої нею операції) на відповідний ваговий коефіцієнт та комерційну ставку витрат. Функція витрат має такий вигляд:

**Вартість = Необхідні транспортні засоби • Коефіцієнт • Ставка витрат на  
одиницю транспортного засобу загальна +**

- + Експлуатаційний час • Коефіцієнт • Ставка витрат за годину експлуатації
- + Експлуатаційні Км • Коефіцієнт • Ставка витрат за Км експлуатації
- + Пробіг без пасажирів (Порожній рейс) • Коефіцієнт • Ставка витрат за годину порожнього рейсу
- + Холостий пробіг в Км • Коефіцієнт • Ставка витрат за Км холостого рейсу
- + Кількість порожніх рейсів • Коефіцієнт
- + Міжрейсовий відстій • Коефіцієнт • Ставка витрат за годину міжрейсового відстою
- + Експлуатаційний час у депо • Коефіцієнт • Ставка витрат за годину в депо
- + Час заряджання • Коефіцієнт • Ставка витрат за годину заряджання

Вплив тих чи інших компонентів витрат на конкретну дугу графа безпосередньо залежить від її технологічного типу. Розподіл вартісних компонентів для окремих типів дуг здійснюється за такою схемою:

*Дуги пасажирських рейсів.*

Експлуатаційний час відображає тривалість проходження секції пасажирського рейсу.

Власне витрати на виконання самого рейсу є неважливими для розв'язання оптимізаційної задачі лінійного блокування, оскільки кожній такій дузі безальтернативно присвоюється одиничний потік. Проте для коректного відображення підсумкових результатів дуги пасажирських рейсів усе одно оцінюються за вартісними ставками часу та відстані, встановленими для відповідної комбінації транспортних засобів.

*Експлуатаційні км пробігу* - відображає відстань, подолану транспортним засобом під час виконання пасажирського рейсу.

*Міжрейсовий відстій* описує сумарну тривалість двох часових інтервалів: між моментом часу початкового вузла та фактичним відправленням із нього, а також між фактичним прибуттям у кінцевий вузол та моментом часу цього кінцевого вузла.

*Дуги порожніх рейсів.*

*Час порожнього рейсу* відображає тривалість виконання нульового пробігу без пасажирів.

*Порожні Км пробігу* – показник відображає відстань, подолану транспортним засобом під час порожнього рейсу.

*Міжрейсовий відстій* визначає тривалість інтервалу між моментом часу початкового вузла та відправленням із нього плюс тривалість між прибуттям у кінцевий вузол та моментом часу кінцевого вузла, за умови, що цей об'єкт є звичайним зупиночним пунктом.

*Відстій у депо* визначає аналогічну сумарну тривалість часових інтервалів для початкового та кінцевого вузлів у випадку, якщо об'єкт моделювання є депо.

*Хронологічні дуги часової шкали.*

*Міжрейсовий відстій та відстій у депо* описують чисту тривалість часового періоду між відмітками часу тих вузлів, які з'єднуються цією хронологічною дугою.

*Розрахунок потреби в рухомому складі та фіксація проміжного результату.*

Для оцінки загальної потреби в рухомому складі до вартісної структури моделі додається фіксована ставка витрат на комбінацію ТЗ. Вона нараховується для кожної дуги, яка перетинає заздалегідь вибраний фіксований момент часу (контрольну точку підрахунку). Оскільки кожен задіяний у системі транспортний засіб (одиниця потоку) змушений перетнути цей контрольний момент часу рівно один раз, у такий спосіб забезпечується точний автоматичний облік та вартісна оцінка загальної кількості необхідних машин.

Як проміжний результат розрахунку формується зважений (оцінений) граф, для якого на наступному етапі алгоритму визначається мережевий потік мінімальної вартості.

### *3. Оптимізація потоку в мережі графа.*

На основі побудованого графа виконано розрахунок математичної моделі з метою визначення потоку мінімальної вартості. Даний етап забезпечив пошук глобального екстремуму цільової функції (мінімізації сукупних витрат або кількості рухомого складу) з урахуванням граничних умов пропускної спроможності дуг та балансу потоків у вузлах графа.

Побудова та вартісна параметризація графа дозволяють знайти розв'язок задачі розподілу потоку мінімальної вартості:

$$\min \sum_{i,j}^{nm} c_{ij} \cdot x_{ij}$$

Отримана математична модель надає інструмент для гнучкого регулювання та розв'язання фундаментального системного конфлікту між мінімізацією обсягів непродуктивних порожніх пробігів (нульових рейсів) та мінімізацією капітальних витрат на залучення додаткових одиниць рухомого складу.

На основі побудованого та зваженого вище графа на цьому етапі визначається мережевий потік мінімальної вартості. Цільова функція витрат параметризується відповідно до алгоритму, описаного на попередньому кроці розрахунку. Завдяки цьому є можливість гнучко регулювати моделювання базового цільового конфлікту — між мінімізацією обсягу порожніх рейсів (нульових пробігів) та мінімізацією загальної потреби в рухомому складі.

На рисунку 1.5. схематично зображено такий потік мінімальної вартості, де проходження кількох одиниць потоку (комбінацій транспортних засобів) через одну дугу графічно відображено у вигляді ліній, накладених одна на одну. На цьому

проміжному етапі аналізу, для спрощення сприйняття топології, значення локальних витрат і пропускних спроможностей дуг не відображаються.

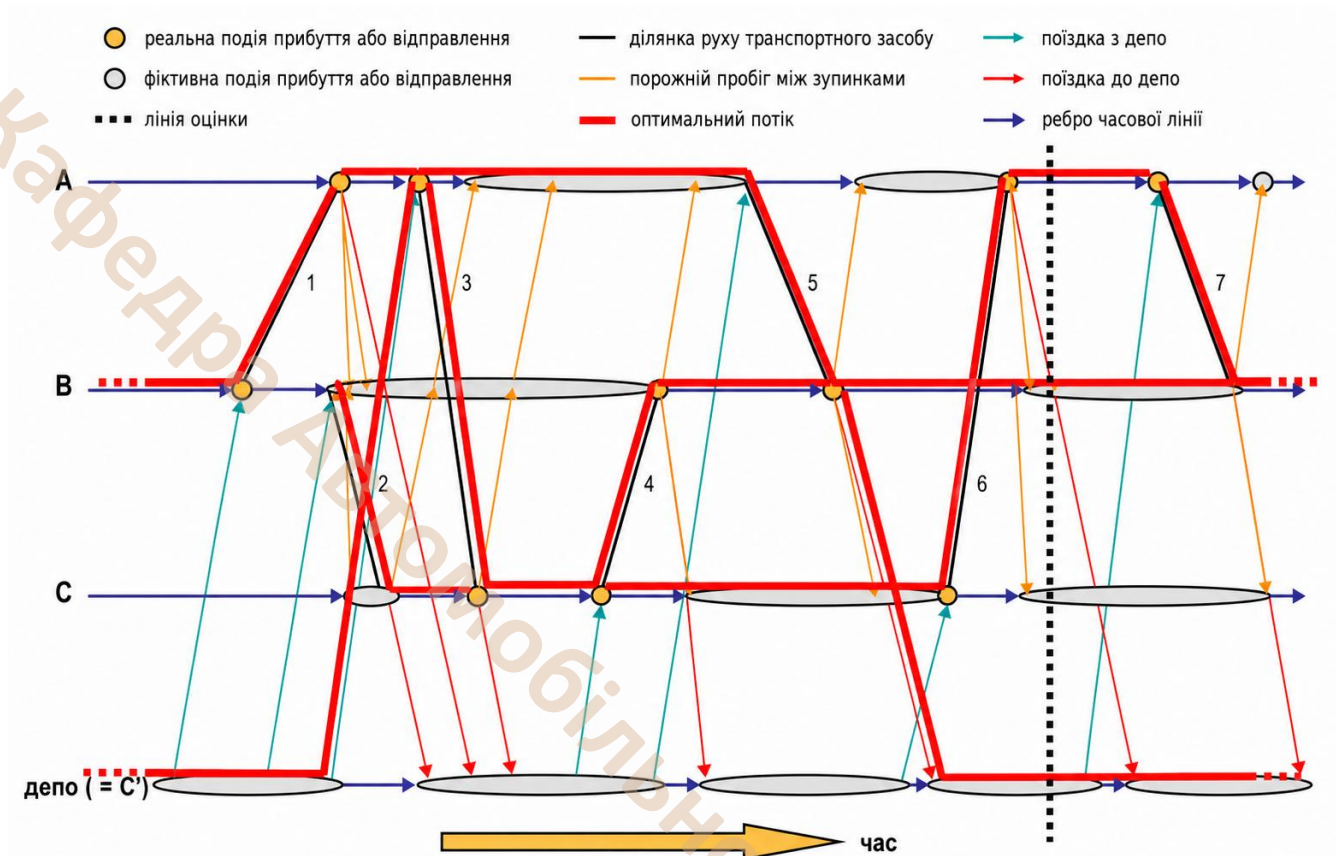


Рис.1.5. Розподіл мережевого потоку мінімальної вартості в топологічній структурі тестового графа

Зазначена графічна інтерпретація підтверджує дотримання критерію обов'язковості обслуговування кожної секції пасажирського рейсу строго однією комбінацією транспортних засобів. Граф також визначає, які саме порожні рейси мають бути виконані для досягнення мінімальної сумарної вартості потоку (тобто це всі дуги нульових пробігів, які перетинає лінія потоку). Загалом у даному прикладі формуються два порожні рейси: один - із пункту C (депо) до пункту A, і один - із пункту B до пункту C. Контрольна лінія підрахунку (оціночна лінія)

перетинає три дуги, що свідчить про загальну потребу в рухомому складі обсягом у 3 одиниці.

*Обмеження потокової моделі та перехід до декомпозиції.*

У результаті виконання описаного процедурного кроку алгоритм формує сукупність аналітичних даних: одержано економічно найефективніший розподіл інтегрального потоку, точно визначено загальну потребу в кількості активних ТЗ, а також ідентифіковано просторово-часові параметри всіх неминучих порожніх рейсів.

На поточному кроці оптимізації безпосередня структура самих лінійних блоків (графіків роботи ТЗ) залишається невизначеною. На основі лише потокової моделі неможливо встановити:

- Конкретні зупиночні пункти та вузли розкладу, де окремі лінійні блоки починають і завершують свою роботу;
- Індивідуальні замкнені маршрути прямування кожного окремого ТЗ всередині глобального оптимального потоку.

Для усунення цієї невизначеності та деталізації результуючих графіків роботи рухомого складу в послідовності процедур запускається фінальний етап — декомпозиція результуючого потоку. Під час цього процесу макроскопічний транспортний потік розділяється на індивідуальні ланцюжки технологічних операцій, які згодом експортуються у вигляді конкретних лінійних блоків для кожного автобуса чи трамвая.

*4. Декомпозиція потоку та агрегування маршрутних (лінійних) блоків.*

На фінальному етапі отриманий оптимальний сумарний потік у графі було декомпоновано на дискретні ланцюжки послідовних технологічних операцій. Здійснено зворотне агрегування цих ланцюжків у цілісні лінійні блоки (зміни/графіки роботи) для конкретних одиниць рухомого складу, які згодом були експортовані у візуальні та табличні форми розкладів PTV Visum.

Сформований на попередньому етапі економічно ефективний мережевий потік може бути представлений у вигляді блоків (графіків випусків) кількома альтернативними способами. З точки зору сумарних операційних витрат, кожне з таких розв'язків є еквівалентним за якістю і, відповідно, математично оптимальним.

Завдання етапу декомпозиції полягає в розбитті загального потоку на окремі ланцюги в межах графа шляхом послідовного розподілу вихідних одиниць потоку для кожного вузла. Таким чином, кожен згенерований ланцюг безпосередньо відповідає одному конкретному блоку. На рис. 1.6 та рис.1.7 проілюстровано два можливих приклади декомпозиції розрахованого економічно оптимального потоку на індивідуальні графіки.

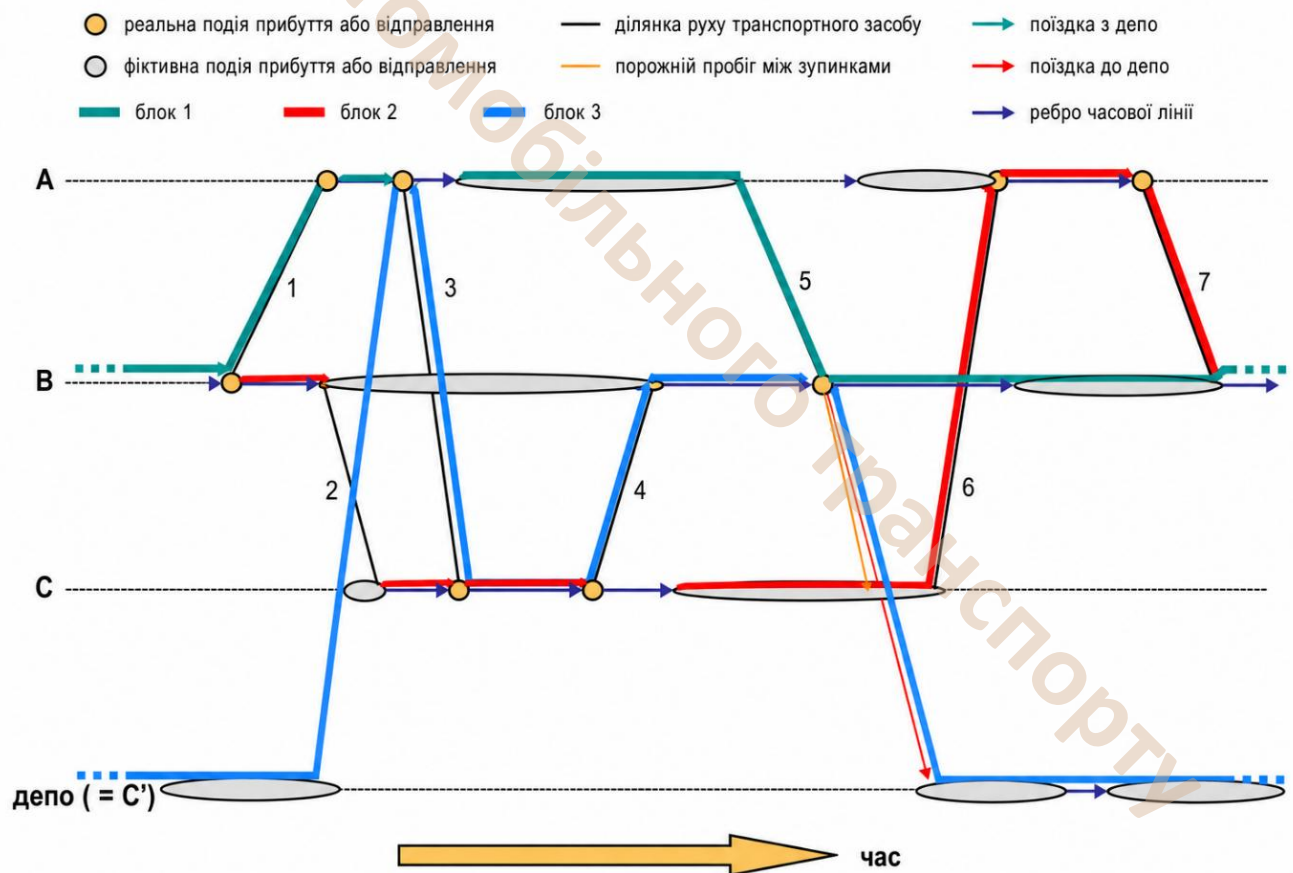


Рис.1.6. Приклад 1 декомпозиції оптимального потоку та індивідуальні графіки

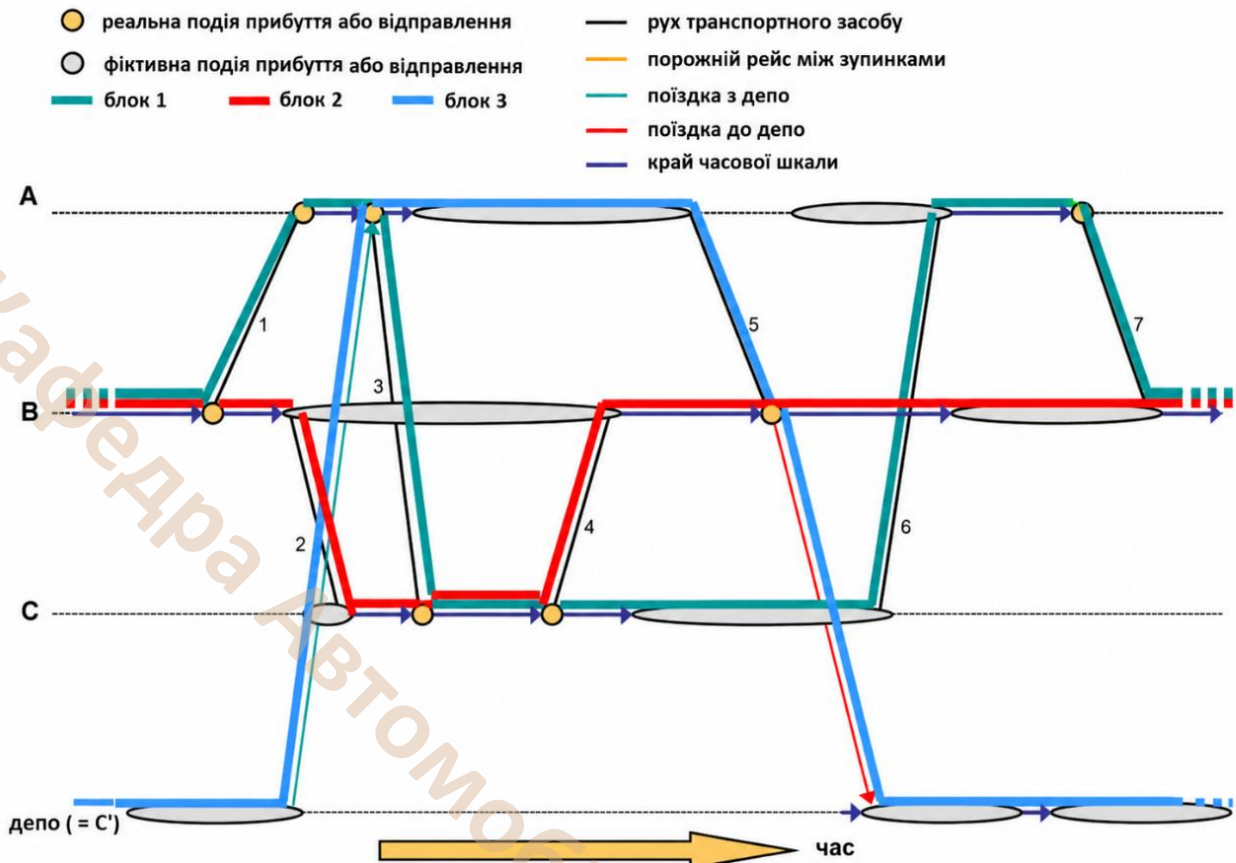


Рис.2.7. Приклад 2 декомпозиції оптимального потоку та індивідуальні графіки

Представлена незалежна задача оптимізації може бути розв'язана відповідно до різних цільових критеріїв. У середовищі Visum передбачено два базових критерії, які також можна комбінувати між собою.

На структуру переключень між секціями пасажирських рейсів у межах одного блоку можна впливати за допомогою таких параметрів:

*Диференційована тривалість міжрейсових відстоїв*: забезпечує максимально нерівномірний розподіл тривалості відстоїв. Іншими словами, формується більша кількість коротких та довгих інтервалів відстою порівняно з їхнім середнім значенням. Метою цього підходу є отримання тривалих технологічних перерв, які можуть бути використані як часові слоти для технічного обслуговування рухомого складу.

*Рівномірна тривалість міжрейсових відстоїв* - забезпечує максимально збалансований та рівномірний розподіл часу відстою. Сформовані таким чином блоки мають виняткову стійкість до лінійних збурень та затримок руху.

*Маршрутна чистота*: алгоритм прагне включати до складу одного блоку рейси лише одного маршруту або, щонайменше, максимально мінімізувати частоту зміни маршрутів у межах добового випуску.

*Без специфічних вимог*: у розрізі цього критерію жодних додаткових обмежень на підсумковий результат не накладається.

*Ідентичність блоків*: під час оптимізації розкладів для періодів планування, що перевищують одну добу, програма прагне розрахувати такі графіки випусків, які є максимально подібними для всіх календарних днів.

У разі генерації зацикленних (закритих) блоків, на загальну тривалість випусків також можна впливати за допомогою таких опцій:

*Пріоритет формування тривалих блоків*: блоки містять максимально можливу кількість днів роботи, що означає, що окремі транспортні засоби послідовно обслуговують кілька маршрутних траєкторій. У граничному випадку всі пасажирські рейси виділеної підсистеми (партиції) можуть бути покриті одним єдиним макроблоком.

*Пріоритет формування коротких блоків*: блоки містять мінімально можливу кількість робочих днів у рамках випуску.

*Без специфічних вимог*: у даному вимірі параметризації жодних обмежень на структуру результату не накладається.

## 1.2. Особливості моделювання графіків громадського транспортного транспорту

Аналогічно до налаштувань відображення транспортної мережі, для блочного представлення графіків роботи рухомого складу (лінійних блоків) у PTV Visum

передбачено можливість налаштування конфігурації графічних параметрів. Доступний інструментарій у PTV Visum значною мірою уніфікований із параметрами графічних та табличних розкладів руху.

Процедуру конфігурування реалізовано через меню «Редактор лінійних блоків» (*Line block editor*) *right arrow* «Редагувати графічні параметри» (*Edit graphic parameters*). Перехід до відповідних вікон керування також здійснювався через контекстне меню елемента лінійного блока у вікні блочного перегляду (*Block view*). Застосування «Попередній перегляд» (*Preview*) дозволило оперативно контролювати внесені зміни без закриття робочого вікна налаштувань.

Параметризація елементів інтерфейсу лінійних блоків.

#### 1. Налаштування шрифтів (Font)

Параметри відображення текстових міток (підписів) лінійних блоків було диференційовано за такими елементами:

*Розмір* (Size): Визначено висоту текстових символів у міліметрах (мм).

*Шрифт* (Font): Задано накреслення (стиль) для маркування блоків.

*Колір* (Color): Установлено колірну палітру для текстових написів.

#### 2. Відображення заголовків (Header data).

Конфігурація заголовків блоків дозволяє гнучко керувати обсягом інформації:

*Відображення даних заголовка* (Show header data): Активація цієї опції забезпечує виведення детальних відображуваних атрибутів у блочному перегляді. У разі деактивації — область відображення дня блока для кожного валідного рівня днів містить лише ідентифікатор (ID) та обраний атрибут версії блокування, а також ID та атрибут самого блока.

*Атрибути відображення* (Display attributes). Для лівої колонки даних заголовка задано індивідуальні атрибути версії блокування, самого блока, комбінації ТЗ та депо, що відрізняються від стандартних міток (*Standard labels*). Інші вихідні значення для обох колонок даних заголовка розраховуються системою автоматично.

*Фон заголовка (Header data > Background):* Налаштовано однорідне або класифіковане відображення фоновому кольору заголовка. На відміну від табличного розкладу, для даних заголовка блоків диференціація за статусами «Активний/Пасивний/Маркований» не застосовується.

Специфікація відображення структурних елементів лінійного блока.

Загальні налаштування маркування та геометрії блоків наведено у таблиці нижче.

Загальні параметри геометрії та маркування блоків.

<b>Назва елемента</b>	<b>Опис функціонального призначення</b>
Внутрішнє маркування (Inner label)	Керування відображенням верхнього (Рядок 1) та нижнього (Рядок 2) текстових підписів безпосередньо всередині геометричного тіла блока.
Зовнішнє маркування (Outer label)	Активція виведення інформаційних підписів над блоком (Верхня мітка) або під ним (Нижня мітка).
Внутрішній інтервал (Inner label %)	Задання відстані між внутрішнім підписом та межею (контуром) блока у відсотковому відношенні до міжрядкового інтервалу.
Зовнішній інтервал (Outer label %)	Задання відстані між зовнішнім підписом та контуром блока у відсотковому відношенні до міжрядкового інтервалу.

Диференціація налаштувань за типами технологічних елементів.

*A. Секції пасажирських рейсів.*

Маркування: для обох внутрішніх рядків та зовнішніх позицій підписів визначено індивідуальні атрибути або встановлено режим відсутності мітки. Функція «Використовувати атрибути для інших елементів лінійного блока» дозволила тиражувати ці налаштування на інші об'єкти.

Колірна класифікація: за допомогою опції «*Використовувати відображення маршрутів*» активовано автоматичну класифікацію активних елементів блоків відповідно до кольорів маршрутних ходів мережі. Статуси та напрямки: на вкладках та задано однорідне або класифіковане (за обраним атрибутом) відображення активних рейсів за напрямками «Туди» та «Назад». Для маркованих та конфліктних рейсів визначено фіксовані кольори заливки та контуру (без класифікації).

*Б. Нульові (порожні) пробіги.*

Маркування: сконфігуровано індивідуальні атрибути для внутрішніх (Рядок 1, 2) та зовнішніх підписів блоків порожніх рейсів. Графіка блока: на вкладках напрямків реалізовано можливість класифікації порожніх рейсів за внутрішніми атрибутами. Для виділених нульових рейсів зафіксовано статичні кольори контуру та заливки.

*В. Відстій у депо.*

Маркування: задано виведення специфічних атрибутів для внутрішніх рядків підпису. Графіка блока: параметризовано відображення активних відстоїв у депо для напрямків (із можливістю класифікації за обраним параметром, наприклад, за тривалістю або типом депо). Для маркованих елементів задано фіксоване колірне кодування.

*Г. Підготовчо-заключний час.*

Маркування: визначено індивідуальні змінні для внутрішнього та зовнішнього графічного підпису технологічних блоків підготовки. Графіка блока: забезпечено налаштування відображення активних підготовчо-заключних інтервалів за напрямками руху (уніфіковане або класифіковане). Для маркованих та конфліктних блоків часу підготовки призначено статичні колірні параметри заливки та межі.

*Д. Користувацькі типи елементів та Вільні дії.*

User-defined: сформовано правила маркування (внутрішнього/зовнішнього) та графічного відображення для індивідуальних, заданих користувачем технологічних

елементів блоків із підтримкою класифікації активних станів та фіксованим виділенням маркованих об'єктів.

Free action: налаштовано відображення вільних дій. Присутня функція синхронізації кольорів із маршрутними ходами. На сторінці *Free action > Pre-/Post-preparation time* активовано опцію відображення часових міток підготовки у хвилинах. Пасивні та марковані стани отримали унікальне статичне колірне маркування.

*Візуалізація технологічних зв'язків та меж відображення.*

Примусові зчеплення. Для відображення технологічних зв'язків між рейсами (ланцюжків примусового зчеплення) за допомогою випадних списків було призначено диференційовані кольори для таких категорій: Невалідні зчеплення; Валідні зчеплення; Реалізовані зчеплення; Марковані зчеплення (*Marked forced chainings*).

Оформлення меж робочої області.

Для оптимізації просторового сприйняття діаграми блоків налаштовано відображення елементів обрамлення: Активовано верхню та нижню часові шкали (лінійки часу). Увімкнено відображення лівого та правого полів робочої області.

На завершальному етапі на сторінці «*Рамка друку*» виконано фінальні налаштування меж, верхніх і нижніх колонтитулів для подальшого експорту або друку графічного матеріалу, після чого внесені параметри підтверджено та застосовано до поточної моделі маршрутного (лінійного) блокування.

## РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ МІЖМАРШРУТНОЇ ВЗАЄМОЗАМІННОСТІ У РОЗКЛАДАХ РУХУ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

### 2.1. Підготовчий етап та налаштування базової моделі

Базова версія моделі Кривого Рогу містила вихідні дані щодо пропозиції транспортних послуг.

Для візуалізації маршрутної мережі пасажирського транспорту завантажено файл графічних параметрів, який диференціює маршрути за відповідними системами транспорту. З метою забезпечення чіткої структуризації моделі та зниження обчислювальної місткості алгоритму, аналіз обмежено локальною підмножиною автобусних маршрутів. За допомогою завантаження файлу фільтра активовано вибірку фільтрацію для конкретних маршрутів.

Реалізація методології дослідження проведена на прикладі автобусів класів А та В (до 22 пасажирів), категорії М2, М3 (22 – 50 пасажирів), категорії М3 (класу 1) – (понад 50 пасажирів), трамваїв одинарних, зчеплених, тролейбусів звичайних та зчленованих.

Порівняльний аналіз сценаріїв оптимізації представлені у наступних параграфах розділу 2.

### 2.2. Сценарій 1: Оптимізація за критерієм мінімізації кількості рухомого складу

У головному меню програми здійснено перехід до розділу версій оптимізації графіків систем громадського транспорту (*PuT line block versions*). На основі базового шаблону створено та відредаговано новий варіант блокування з кодовим позначенням та назвою *B\_LnoC\_OptNum*.

Дана конфігурація базується на принципі чистоти маршруту, що передбачає обмеження виконання рейсів у межах одного блока рухомого складу лише одним

маршрутом (або зведення кількості міжмаршрутних переходів до мінімуму). Критерієм оптимізації визначено загальну кількість задіяних одиниць ТЗ.

При налаштуванні параметрів було задано автоматичне генерування системних маршрутів, а у вкладці підготовчо-заключного часу активовано врахування тривалості підготовчих та прикінцевих операцій (*Consider pre/post-preparation times*). У структурі маршрутного блока також можуть виконуватися порожні (нульові) пробіги для переміщення комбінації транспортних засобів між двома пасажирськими рейсами. Для формування холостих пробігів використовуються наявні в моделі системні маршрути. У разі відсутності відповідного системного маршруту виконується розрахунок пошуку найкоротшого шляху. Після успішного завершення цього розрахунку на основі отриманих даних автоматично створюється новий системний маршрут

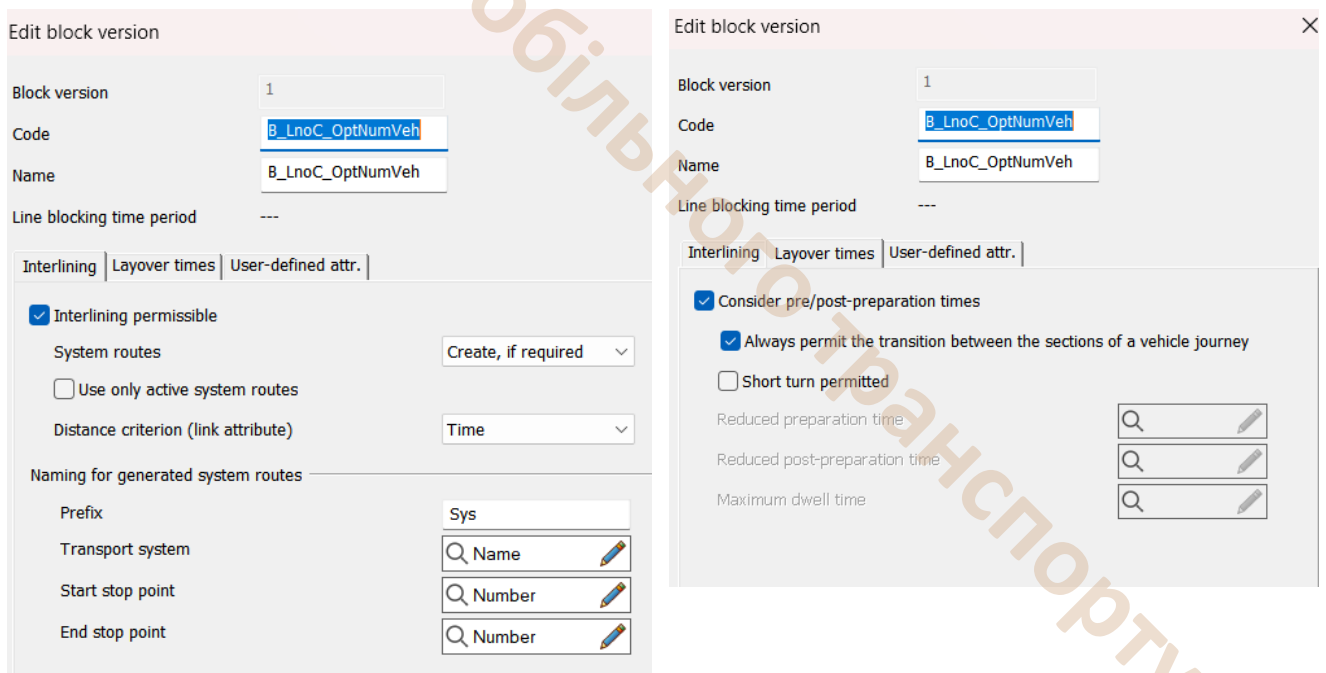


Рис.2.1. Налаштування параметрів оптимізації

У вікні послідовності процедур (*Procedure sequence*) сформовано такий алгоритм:

1. Процедура видалення існуючих маршрутних (лінійних) блоків (*Delete line blocks*) із посиланням на створену версію блокування.
2. Процедура розрахунку маршрутного (лінійного) блокування (*Line blocking*).

У параметрах процедури на вкладці *Basis* активовано врахування лише активних секцій пасажирських рейсів. На вкладці транспортних систем (*Transport systems*) скасовано вимогу ідентичності системи транспорту для наступного рейсу, проте встановлено прапорець «Ідентичний маршрут для наступного рейсу» (*Same line for next vehicle journey*). Наступним рейсом може бути виключно пасажирський рейс того самого маршруту (лінії). Інші параметри процедури залишились встановленими за замовчуванням.

255	<input type="checkbox"/>	Put relation-based analysis	---
256	<input checked="" type="checkbox"/>	Delete line blocks	Block version 1 B_LnoC_OptNumVeh
257	<input type="checkbox"/>	Calculate service trip pattern	
258	<input checked="" type="checkbox"/>	Line blocking	Block version 1 B_LnoC_OptNumVeh

Рис.2.2. Створення процедур розрахунку

Line blocking parameters

Block version 1 B\_LnoC\_OptNumVeh

Line blocking time period ---

Line blocking with vehicle interchange (no license)

Basis | Properties of line blocks | Interlining | Layover times | Transport systems | Costs |

Same operator for next vehicle journey

Same TSys for next vehicle journey

Same line for next vehicle journey

Number: 124	Vehicle combination	Operator	TSys	Line	Empty trip-TSys
1	Клас А, В (до 22 пас.)	No operator		A_№24 Standard (Bus)	
2	Клас А, В (до 22 пас.)	No operator		MT_№ Standard (Marshrutka)	
3	Клас А, В (до 22 пас.)	No operator		MT_№ Standard (Marshrutka)	
4	Клас А, В (до 22 пас.)	No operator		MT_№ Standard (Marshrutka)	
5	Клас А, В (до 22 пас.)	No operator		MT_№ Standard (Marshrutka)	
6	Клас А, В (до 22 пас.)	No operator		MT_№ Standard (Marshrutka)	
7	Клас А, В (до 22 пас.)	No operator		MT_№ Standard (Marshrutka)	
8	Клас А, В (до 22 пас.)	No operator		MT_№ Standard (Marshrutka)	
9	Клас А, В (до 22 пас.)	No operator		MT_№ Standard (Marshrutka)	
10	Клас А, В (до 22 пас.)	No operator		MT_№ Standard (Marshrutka)	
11	Клас А, В (до 22 пас.)	No operator		MT_№ Standard (Marshrutka)	
12	Клас А, В (до 22 пас.)	No operator		MT_№ Standard (Marshrutka)	
13	Клас А, В (до 22 пас.)	No operator		MT_№ Standard (Marshrutka)	
14	Клас А, В (до 22 пас.)	No operator		MT_№ Standard (Marshrutka)	
15	Клас А, В (до 22 пас.)	No operator		MT_№ Standard (Marshrutka)	
16	Клас А, В (до 22 пас.)	No operator		MT_№ Standard (Marshrutka)	

Рис.2.3. Налаштування процедури розрахунку маршрутного блокування

### 2.3. Сценарій 2: Оптимізація за критерієм мінімізації нульових пробігів

Для дослідження впливу вартісних коефіцієнтів створено другу версію блокування під назвою B\_LnoC\_OptEmpty. Налаштування міжмаршрутного інтервалу та підготовчого часу збережено аналогічно до Сценарію 1.

У вікні процедур налаштовано виконання лінійного блокування для нового сценарію, проте на вкладці витрат (*Costs*) внесено вагові коефіцієнти для часових та кілометражних показників порожніх пробігів: для параметрів «Час нульового пробігу» (*Empty time*) та «Нуловий пробіг ТЗ» (*Empty Km*) встановлено коефіцієнт 20.

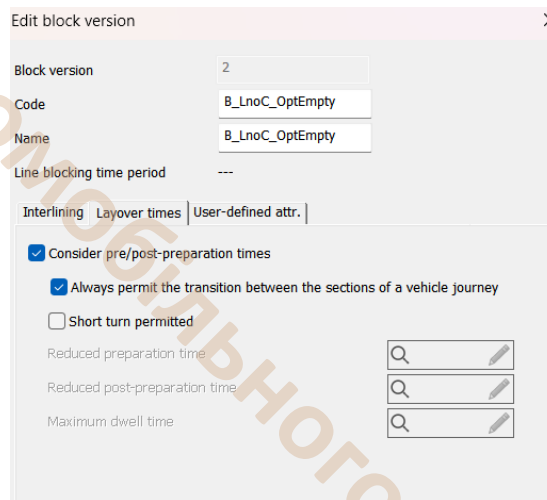


Рис.2.4. Налаштування параметрів оптимізації

Costs of an activity =					
	Coefficient	Attribute		Cost rate	Value if no vehComb
	1.00	Required vehicles	*	Vehicle unit total	10000.00
+	1.00	Service time	*	Hour service	45.00
+	1.00	Service kilometers/miles	*	km / mi service	1.50
+	1.00	Empty time	*	Hour empty	20.00
+	1.00	Empty Km/Mi	*	Km / Mi empty	20.00
+	0.00	Number of empty trips	*		0.00
+	1.00	Layover	*	Hour layover	25.00
+	1.00	Layover in depot	*	Hour depot	15.00

Рис.2.5. Налаштування процедури розрахунку маршрутного блокування

## 2.4. Сценарій 3: Оптимізація за кількістю ТЗ в умовах допущення міжрейсових переходів

Для визначення ефекту від інтеграції маршрутів створено третю версію лінійного блокування — LC\_OptNumVeh. Даний варіант допускає зміну маршруту транспортним засобом протягом зміни (обмін між маршрутами).

У налаштуваннях процедури маршрутного (лінійного) блокування на вкладці транспортних систем (*Transport systems*) змінено пріоритети: активовано вимогу збереження системи транспорту (*Same TSys for next vehicle journey*) (наступним рейсом може бути виключно пасажирський рейс, який виконується в межах тієї самої системи транспорту), але знято обмеження щодо обов'язкової прив'язки до конкретного маршруту (*Same line for next vehicle journey*) – рис.2.7. Критерієм оптимізації знову виступала мінімальна кількість ТЗ.

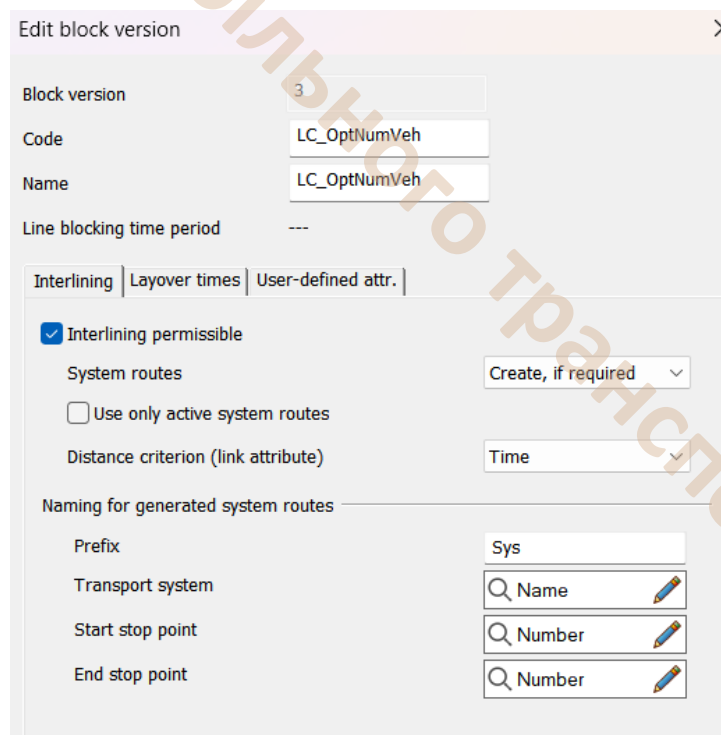


Рис.2.6. Налаштування параметрів оптимізації

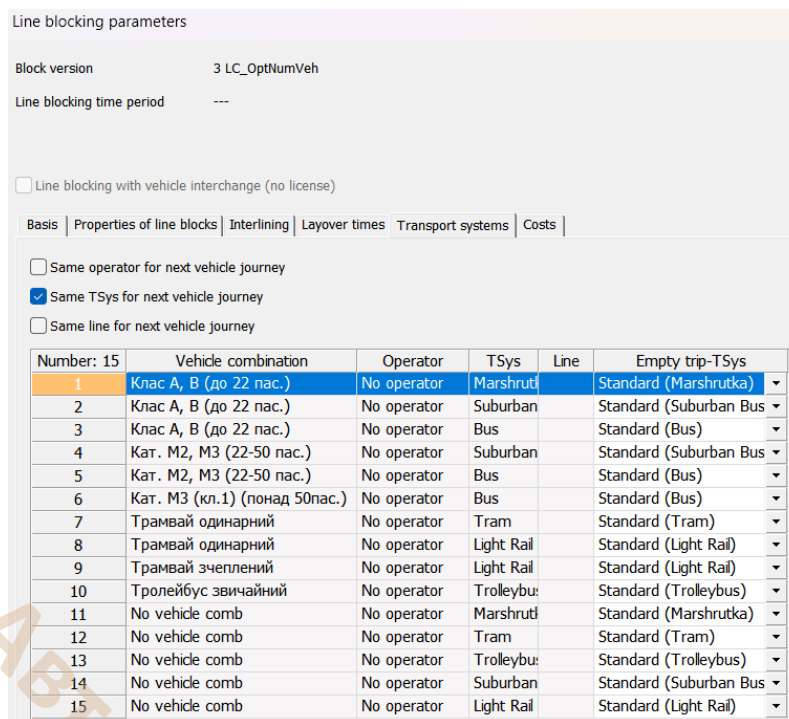


Рис.2.7. Налаштування процедури розрахунку маршрутного блокування

## 2.5. Сценарій 4: Оптимізація за часом нульових пробігів в умовах допущення міжмаршрутних переходів

Створено четверту версію блокування В\_LC\_Empty з метою суміщення міжмаршрутного обміну та мінімізації порожніх пробігів. На вкладці витрат (*Costs*) встановлено штрафні коефіцієнти для часу та кілометражу порожніх рейсів на рівні 20. На вкладці транспортних систем скасовано обмеження як щодо ідентичності систем транспорту, так і щодо ідентичності маршрутів для наступних рейсів ТЗ. У той же час, наступним рейсом може бути виключно пасажирський рейс, який обслуговується тим самим оператором (перевізником) (рис.2.8).

Для детального вивчення структури сформованих графіків роботи рухомого складу використано графічний інструмент «Редактор лінійних блоків» (*Line block editor*).

Line blocking parameters

Block version 4 B\_LC\_OptEmpty

Line blocking time period ---

Line blocking with vehicle interchange (no license)

Basis | Properties of line blocks | Interlining | Layover times | Transport systems | Costs

Same operator for next vehicle journey

Same TSys for next vehicle journey

Same line for next vehicle journey

Number: 7	Vehicle combination	Operator	TSys	Line	Empty trip-TSys
1	Клас А, В (до 22 пас.)	No operator			Standard (Bus) ▾
2	Кат. М2, М3 (22-50 пас.)	No operator			Standard (Bus) ▾
3	Кат. М3 (кл.1) (понад 50пас.)	No operator			Standard (Bus) ▾
4	Трамвай одинарний	No operator			Standard (Light Rail) ▾
5	Трамвай зчеплений	No operator			Standard (Light Rail) ▾
6	Тролейбус звичайний	No operator			Standard (Trolleybus) ▾
7	No vehicle comb	No operator			Standard (Bus) ▾

Рис.2.8. Налаштування процедури розрахунку маршрутного блокування

## 2.6. Сценарій 5: Оптимізація із прив'язкою до перевізника та транспортної системи

У рамках дослідження використання рухомого складу різної пасажиромісткості у межах однієї транспортної системи створено п'яту версію блокування B\_LC\_V\_OptCost, яка також враховує умову мінімізації порожніх пробігів. На вкладці витрат (*Costs*) встановлено штрафні коефіцієнти для часу та кілометражу порожніх рейсів на рівні 20, як і в попередньому сценарії. На вкладці транспортних систем застосовано обмеження щодо ідентичності систем транспорту та перевізника (рис.2.9), щ краще відповідає реальним умовам пасажирських перевезень у місті, ніж сценарій 4.

Line blocking parameters

Block version 5 B\_IC\_VE\_OptCost

Line blocking time period ---

Line blocking with vehicle interchange (no license)

Basis | Properties of line blocks | Interlining | Layover times | Transport systems | Costs |

Same operator for next vehicle journey

Same TSys for next vehicle journey

Same line for next vehicle journey

Number: 29	Vehicle combination	Operator	TSys	Line	Empty trip-TSys
1	Клас А, В (до 22 пас.)	No operator	Marshrut		Standard (Marshrutka)
2	Клас А, В (до 22 пас.)	ПАТ Північтранс	Marshrut		Standard (Marshrutka)
3	Клас А, В (до 22 пас.)	ПАТ Північтранс	Suburban		Standard (Suburban Bus)
4	Клас А, В (до 22 пас.)	ПП Одум-Прес	Bus		Standard (Bus)
5	Кат. М2, М3 (22-50 пас.)	No operator	Bus		Standard (Bus)
6	Кат. М2, М3 (22-50 пас.)	ПАТ Північтранс	Suburban		Standard (Suburban Bus)
7	Кат. М2, М3 (22-50 пас.)	ПАТ Північтранс	Bus		Standard (Bus)
8	Кат. М2, М3 (22-50 пас.)	ПП Одум-Прес	Suburban		Standard (Suburban Bus)
9	Кат. М2, М3 (22-50 пас.)	ПП Одум-Прес	Bus		Standard (Bus)
10	Кат. М2, М3 (22-50 пас.)	ТОВ АвтоТран	Suburban		Standard (Suburban Bus)
11	Кат. М3 (кл.1) (понад 50пас.)	No operator	Bus		Standard (Bus)
12	Кат. М3 (кл.1) (понад 50пас.)	КП Миський трс	Bus		Standard (Bus)
13	Трамвай одинарний	No operator	Tram		Standard (Tram)
14	Трамвай одинарний	КП Швидкісний	Tram		Standard (Tram)
15	Трамвай одинарний	КП Швидкісний	Light Rail		Standard (Light Rail)
16	Трамвай зчеплений	КП Швидкісний	Light Rail		Standard (Light Rail)

Рис.2.9. Налаштування процедури розрахунку маршрутного блокування

## 2.7. Висновки до розділу 2

Таким чином, виконано моделювання таких сценаріїв лінійного блокування:

Сценарій 1: оптимізовано кількість рухомого складу за умови дотримання «лінійної чистоти» (без міжмаршрутних переходів).

- Сценарій 2: визначено чутливість моделі до витрат шляхом введення вагових коефіцієнтів (рівня 20) для мінімізації часу та кілометражу холостих пробігів.

- Сценарії 3 та 4: реалізовано алгоритми з допущенням міжмаршрутного обміну ТЗ.

- Сценарій 5: проведено оптимізацію, яка відповідає умовам ідентичності перевізника та транспортної системи із введенням вагових коефіцієнтів для мінімізації часу та холостого пробігу.

За допомогою інструменту *Line block editor* виконано порівняльний аналіз структури сформованих графіків роботи рухомого складу, що підтвердило зміну співвідношення продуктивних рейсів, підготовчо-заключного часу та нульових пробігів у різних конфігураціях моделі.

### РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МІЖМАРШРУТНОЇ ВЗАЄМОЗАМІННОСТІ У РОЗКЛАДАХ РУХУ

#### 3.1. Сценарій 1

**Результати моделювання:** після виконання розрахунку та аналізу вихідних списків атрибутів встановлено, що для забезпечення розкладу відповідно до заданих умов необхідна сукупна кількість у 612 транспортних засобів (Табл.3.1). Сумарна тривалість холостих пробігів склала близько 1041 годин 41 хв., сумарний час обслуговування - 5048 год. 57 хв., сумарний час в роботі - 6090 год. 39 хв.

Табл.3.1

#### Результати моделювання сценарію 1

Всього	Необхідна кількість транспортних засобів						
	Авт. кл. А та Б	Автобус кат. М2, М3	Автобус кат. М3 (кл. 1)	Трамвай		Тролейбус	
				одинарний	зчеплений	звичайний	зчленований
612	143	25	35	25	14	8	0

#### 3.2. Сценарій 2

**Результати моделювання:** перехід до оптимізації за часом порожніх пробігів призвів не змінив розмір парку рухомого складу. Сумарний час та обсяг холостих (непродуктивних) пробігів очікувано зменшилися до 669 год. 25 хв., сумарний час обслуговування – залишився незмінним, сумарний час в роботі – зменшився до 5718 год. 21 хв.

### Результати моделювання сценарію 2

Всього	Необхідна кількість транспортних засобів						
	Авт. кл. А та Б	Автобус кат. М2, М3	Автобус кат. М3 (кл. 1)	Трамвай		Тролейбус	
				одинарний	зчеплений	звичайний	зчленований
596	136	20	35	25	14	8	0

### 3.3.Сценарій 3

**Результати моделювання:** Розрахункова потреба у рухомому складі зменшилась до 450 одиниць. Проте через допущення міжмаршрутного обміну сумарний час холостих пробігів зріс порівняно з сценаріями 1 та 2 (із дотриманням лінійної чистоти), оскільки ТЗ здійснювали переміщення між кінцевими пунктами різних маршрутів, до 1310 год. 53 хв., час обслуговування зменшився до 4312 год. 52 хв., сумарний час в роботі – становив 5623 год. 45 хв.

### Результати моделювання сценарію 3

Всього	Необхідна кількість транспортних засобів						
	Авт. кл. А та Б	Автобус кат. М2, М3	Автобус кат. М3 (кл. 1)	Трамвай		Тролейбус	
				одинарний	зчеплений	звичайний	зчленований
450	128	9	31	13	13	0	0

### 3.4. Сценарій 4

**Результати моделювання:** загальна потреба в рухомому складі склала 386 одиниць ТЗ. Отримані показники часу холостих пробігів виявилися найнижчими порівняно з іншими сценаріями – 420 год. 14 хв.

Табл.3.4

#### Результати моделювання сценарію 4

Всього	Необхідна кількість транспортних засобів						
	Авт. кл. А та Б	Автобус кат. М2, М3	Автобус кат. М3 (кл. 1)	Трамвай		Тролейбус	
				одинарний	зчеплений	звичайний	зчленований
386	11	10	34	0	13	0	0

### 3.5. Сценарій 5

**Результати моделювання:** загальна потреба в рухомому складі становила 472 транспортних засобів. Сумарний час холостих пробігів – 609 год. 45 хв., сумарний час обслуговування – 432 год. 30 хв., сумарний час в роботі – 4934 год. 16 хв.

Табл.3.5

#### Результати моделювання сценарію 5

Всього	Необхідна кількість транспортних засобів						
	Авт. кл. А та Б	Автобус кат. М2, М3	Автобус кат. М3 (кл. 1)	Трамвай		Тролейбус	
				одинарний	зчеплений	звичайний	зчленований
472	132	13	34	13	13	0	0

### 3.6. Графічна візуалізація результатів

Для детального вивчення структури сформованих графіків роботи рухомого складу використано графічний інструмент «Редактор лінійних блоків» (*Line block editor*), що підтвердило зміну співвідношення продуктивних рейсів, підготовчо-заклучного часу та нульових пробігів у різних конфігураціях моделі.

У середовищі PTV Visum лінійні блоки відображаються у вигляді діаграм Ганта (вікно блочного перегляду — *Block view*) (рис.3.1). На відміну від графіків руху у просторово-часових координатах (траєкторій рейсів), які ілюструють блоки лише в межах послідовності зупиночних пунктів для прив'язаних рейсів, діаграма Ганта забезпечує природне сприйняття лінійного блока як єдиного цілого. При цьому візуалізуються всі технологічні елементи (дії) блока, а також інша супутня інформація, зокрема дані заголовків, холості пробіги та міжрейсові відстої. З метою підвищення наочності сприйняття структури діаграми доступна функція обмеження складу відображуваних елементів за допомогою різних критеріїв фільтрації, а також реалізовано можливість глибокого конфігурування графічних параметрів відповідно до стандартних процедур програмного комплексу.

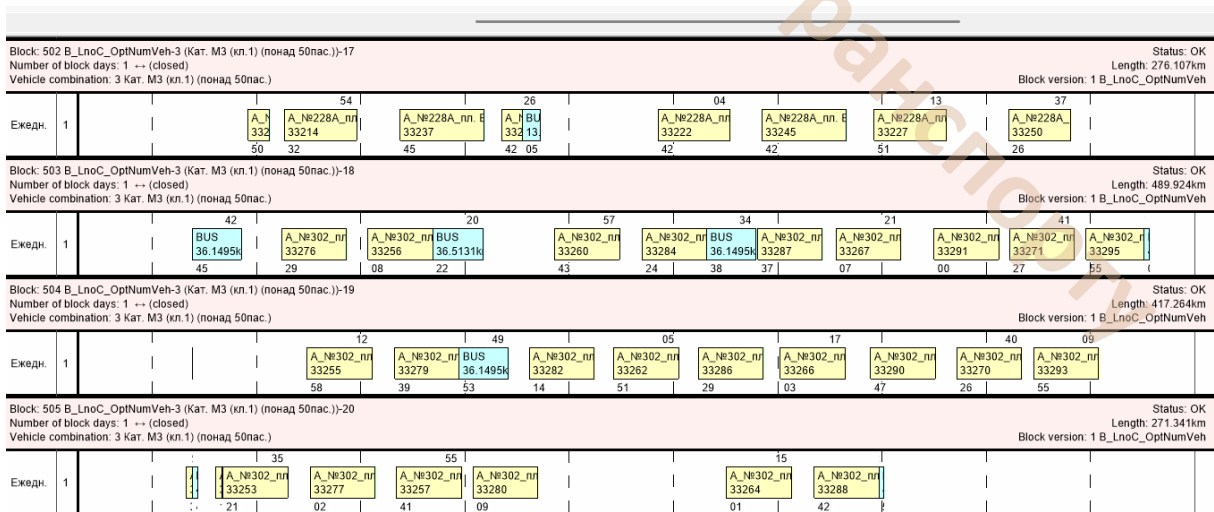


Рис. 3.1. Фрагмент діаграми Ганта для сценарію 1

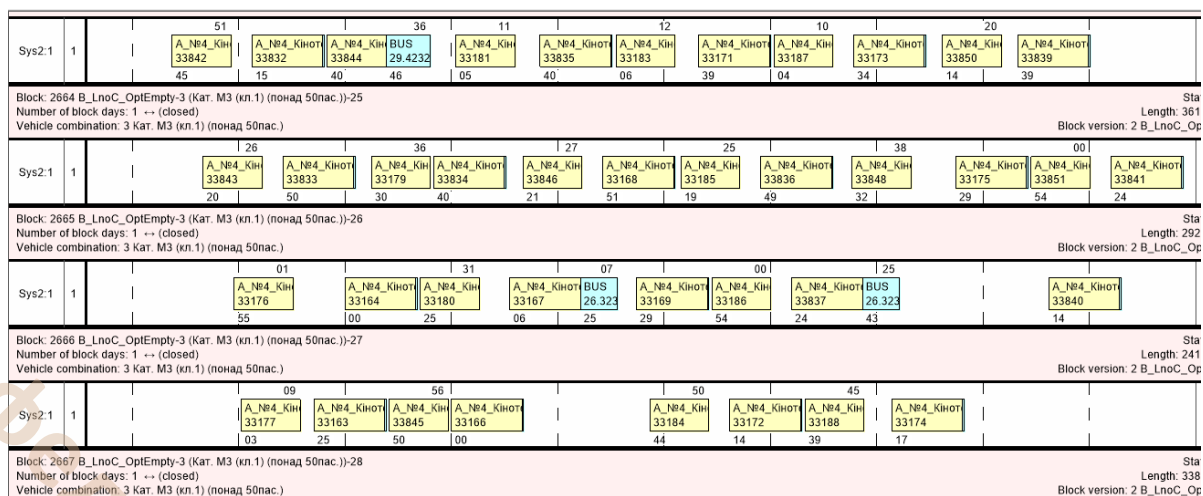


Рис.3.2. Фрагмент діаграми Ганта для сценарію 2

На діаграмах чітко зафіксовано роботу окремих одиниць рухомого складу на різних маршрутах протягом зміни, що відображалось послідовністю сегментів різного кольору в межах одного рядка ТЗ.

Порівняльний аналіз графіків підтвердив зменшення кількості помаранчевих сегментів (порожніх пробігів), що було досягнуто за рахунок нехтуванням обмеженням щодо вибору транспортної системи та перевізника.

Моделювання сценаріїв показало обґрунтованість монополізації ринку транспортних послуг (наприклад, за рахунок комунального транспорту) з точки зору можливості оперуваннями одним перевізником різних транспортних систем (сценарій 4). З погляду системної оптимізації найбільш раціональним є сценарій 5, який забезпечує мінімізацію холостих пробігів за умов жорсткого технологічного обмеження щодо збереження оператора та системи транспорту для суміжних рейсів. Застосування цієї конфігурації дозволяє скоротити сумарні витрати часу на нульові рейси в транспортній мережі до 609 год 45 хв.

## ВИСНОВКИ

На основі розробленої багатосценарної прогностичної моделі лінійного блокування пасажирського транспорту м. Кривого Рогу в середовищі *PTV Visum* реалізовано комплексний (для всієї мережі) підхід до оптимізації графіків роботи рухомого складу. Проведені розрахунки дозволили кількісно оцінити вплив технологічних обмежень (лінійної чистоти, міжмаршрутного обміну, закріплення за операторами та системами транспорту) на ключові техніко-експлуатаційні та економічні показники системи перевезень.

1. Перехід від ізольованого обслуговування ліній (Сценарії 1, 2) до інтегрованого планування з допущенням переключення рухомого складу між різними маршрутами (Сценарії 3, 4, 5) продемонстрував високу ефективність у розв'язанні фундаментального системного конфлікту транспортного моделювання. Активація міжмаршрутної взаємозамінності дозволяє радикально знизити капітальні витрати на утримання надлишкового парку транспортних засобів (ТЗ).

2. Аналіз екстремальних сценаріїв (Сценарії 1 та 4): Сценарій 1 (базовий, з дотриманням «лінійної чистоти») вимагає максимального залучення парку рухомого складу — 612 одиниць ТЗ, що зумовлено неефективним накопиченням тривалих міжрейсових відстоїв на кінцевих пунктах без можливості корисного маневру.

3. Сценарій 4 (максимальна інтеграція без обмежень перевізника та систем) забезпечив досягнення глобального математичного екстремуму: зниження потреби в парку рухомого складу до 386 одиниць ТЗ (скорочення на 36,9% відносно Сценарію 1) при мінімальному сумарному часі нульових пробігів (420 год 14 хв). Проте цей сценарій є суто теоретичним (ідеалізованим), оскільки він повністю нівелює ринкову структуру перевезень та технологічні відмінності рухомого складу.

4. Введення підвищених штрафних коефіцієнтів (рівня 20) за час та кілометраж холостих пробігів у Сценарії 2 дозволило оптимізувати траєкторії холостих рейсів без зміни маршрутної прив'язки, скоротивши час у дорозі при холостому пробігу до 669 год 25 хв.

5. Вільний міжмаршрутний обмін у Сценарії 3 без вартісного обмеження холостих рейсів призвів до дестабілізації системи: сумарний час нульових пробігів зріс до пікового значення 1310 год 53 хв, що підтверджує схильність алгоритму генерувати надлишкові хаотичні перегонки ТЗ між віддаленими кінцевими точками заради економії однієї одиниці техніки.

6. Результати розрахунків Сценарію 4 математично доводять високу доцільність концепції монополізації або суттєвої централізації ринку міських пасажирських перевезень (наприклад, шляхом розширення частки єдиного комунального перевізника). Можливість оперативного управління єдиним оператором різними системами транспорту (автобус, тролейбус, трамвай) знімає організаційні бар'єри та відкриває максимальний потенціал для оптимізації добових випусків.

7. З погляду практичної реалізації та адаптації до реальних умов функціонування транспортного комплексу м. Кривого Рогу, найбільш раціональним визначено Сценарій 5. Завдяки поєднанню цільової функції мінімізації витрат на холості рейси із жорсткими граничними умовами щодо збереження оператора (перевізника) та системи транспорту для суміжних рейсів, досягнуто оптимального балансу: необхідний парк ТЗ зафіксовано на рівні 472 одиниць (що на 22,8% менше за базовий рівень); сумарний час холостих пробігів у мережі утримано в межах 609 год 45 хв. (скорочення на 41,4% порівняно зі Сценарієм 1); виключено неможливі в реальних умовах ситуації зміни форми власності чи технологічного типу ТЗ (наприклад, переключення водія автобуса на трамвайний рейс або обслуговування приватним ліцензіатом комунального маршруту) всередині однієї робочої зміни.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Боднар М. С. Моделювання та аналіз транспортних потоків для міського трафіку з використанням теорії максимального потоку : магістерська дис. : 124 "Системний аналіз" / Боднар Максим Сергійович. Київ, 2024. 98 с.
2. Методичні рекомендації з моделювання транспортних потоків під час оцінювання ефективності проєктних рішень щодо дорожньої інфраструктури (перша редакція) : МР – Б.2.2-37641918-928:2022. [Чинний від 2022]. Київ, 2022.
3. Осетрін М. М., Тарасюк В. П., Беспалов Д. О. Транспортне імітаційне моделювання : конспект лекцій. Київ : КНУБА, 2023. 76 с.
4. Черкашин Д. Є. Моделювання часу очікування пасажирями громадського транспорту в місті Черкаси : кваліфікаційна робота ... бакалавра : 275.03 "Транспортні технології (на автомобільному транспорті)". Харків : ХНАДУ, 2025. 92 с.
5. Transport Analysis Guidance (TAG). TAG unit M3-2: public transport assignment modelling, including forthcoming changes for May 2024 / Department for Transport. London, 2024.
6. JASPERS Appraisal Guidance (Transport). The Use of Transport Models in Transport Planning and Project Appraisal / JASPERS. Luxembourg, 2014.
7. Ceder A. Public Transit Planning and Operation: Modeling, Practice and Behavior. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2016. 724 p.
8. Ortúzar J. de D., Willumsen L. G. Modelling Transport. 4th ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2011. 536 p.
9. Vuchic V. R. Urban Transit: Operations, Planning and Economics. Hoboken : John Wiley & Sons, 2005. 664 p.
10. PTV Visum 2026 : Manual. Karlsruhe : PTV Group, 2026. 2780 p.