

САВЧЕНКО АНАТОЛІЙ АНДРІЙОВИЧ

Допускається до захисту:
в.о. завідувача кафедри
інформаційних технологій
канд. техн. наук, доцент
_____ О. В. Зелінська
« ____ » _____ 20__ р.

**ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОЇ
МАРШРУТИЗАЦІЇ ШКІЛЬНИХ АВТОБУСІВ**

Спеціальність 122 Комп'ютерні науки

Кваліфікаційна (магістерська) робота

Науковий керівник:
Штовба С. Д., професор
кафедри інформаційних
технологій, д.т.н., професор

Оцінка: _____ / _____ / _____
(бали/за шкалою ЕКТС/за національною шкалою)

Голова ЕК: _____

АНОТАЦІЯ

Актуальність роботи визначається необхідністю вдосконалення систем шкільного транспорту в умовах зростання кількості учнів та ускладнення транспортних потоків. Метою є створення інноваційної інформаційної системи для автоматизації та оптимізації процесу маршрутизації шкільних автобусів.

У роботі детально проаналізовано існуючі моделі та алгоритми маршрутизації, включаючи класичні методи та сучасні підходи на основі штучного інтелекту. Виявлено їх недоліки при застосуванні в умовах шкільних перевезень.

Запропоновано вдосконалену математичну модель з урахуванням специфіки шкільних маршрутів. Розроблено гібридний алгоритм на основі поєднання методів Дейкстри та 3-ОРТ, що дозволяє оптимізувати маршрути за критеріями часу, відстані та витрат.

Реалізовано програмний прототип інформаційної системи з інтуїтивним інтерфейсом та можливостями візуалізації маршрутів на карті. Проведено експериментальне дослідження на реальних даних, яке підтвердило ефективність запропонованих рішень.

Робота має наукову новизну в частині розробки гібридного алгоритму маршрутизації та створення інформаційної системи з інноваційним функціоналом. Практичне значення полягає у можливості впровадження системи для оптимізації шкільних перевезень.

Рекомендовано розширення функціоналу системи аналітичними інструментами та інтеграцію з мобільними додатками. Перспективним є застосування методів штучного інтелекту для подальшої оптимізації маршрутів.

ABSTRACT

The relevance of the work is determined by the need to improve school transport systems in the face of increasing numbers of students and more complicated transport flows. The aim is to create an innovative information system for automation and optimization of the school bus routing process.

The paper provides a detailed analysis of existing routing models and algorithms, including classical methods and modern artificial intelligence approaches. Their shortcomings when applied in school transportation conditions are identified.

An improved mathematical model is proposed, taking into account the specifics of school routes. A hybrid algorithm is developed based on a combination of Dijkstra's and 3-OPT methods, which allows optimizing routes by time, distance and cost criteria.

A software prototype of an information system with an intuitive interface and route visualization capabilities on the map has been implemented. An experimental study on real data has been conducted, which confirmed the effectiveness of the proposed solutions.

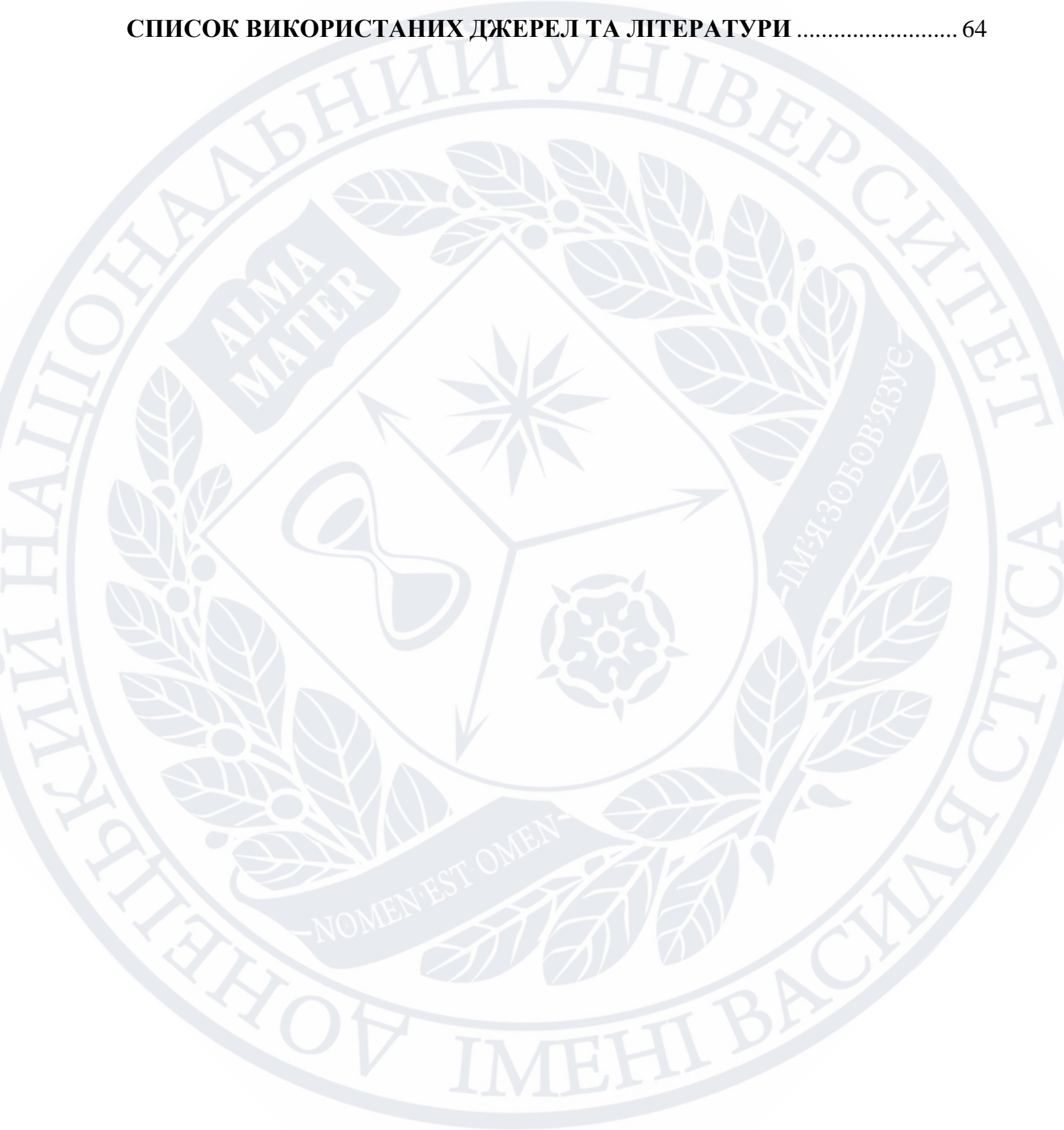
The work has scientific novelty in terms of developing a hybrid routing algorithm and creating an information system with innovative functionality. The practical significance lies in the ability to implement the system to optimize school transportation.

It is recommended to expand the system's functionality with analytical tools and integration with mobile applications. The application of artificial intelligence methods for further route optimization is a promising direction.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ І ОГЛЯД АНАЛОГІВ ІСНУЮЧИХ ДОДАТКІВ ЗА ДАНОЮ ТЕМАТИКОЮ	7
1.1 Опис актуальності дослідження методів оптимізації транспортування шкільних автобусів	7
1.2 Огляд конкурентних програмних систем	8
1.3 Огляд моделей та алгоритмів	10
1.4 Деталізація завдань розробки	16
Висновок до розділу 1	17
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ МАРШРУТИЗАЦІЇ ШКІЛЬНИХ АВТОБУСІВ	19
2.1 Формалізація задачі маршрутизації шкільних автобусів	19
2.2 Математичні Моделі Маршрутизації	22
2.3 Розробка Алгоритмів Маршрутизації	24
2.4 Аналіз ефективності моделей та алгоритмів	26
2.4 Інші важливі аспекти	32
Висновок до розділу 2	33
РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ	34
3.1 Технічні засади реалізації	34
3.2 Архітектура Системи	36
3.3 Інтерфейс та Взаємодія з Користувачем	39
3.4 Оптимізація та Алгоритми	46
3.4.1 Визначення Оптимальних Маршрутів.....	46
3.4.2 Використані Алгоритми.....	46
3.4.3 Переваги та Недоліки Використаних Алгоритмів.....	48
Висновки до Розділу 3	50
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ	52
4.1 Постановка Експериментів	52
4.2 Метрики та Критерії Оцінки	56
4.3 Порівняння Результатів	57
4.4 Обґрунтування Вибору Алгоритму	59
4.5 Висновки з Експериментальних Досліджень	60

Висновки до Розділу 4.....	62
ВИСНОВКИ	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ	64



ВСТУП

Актуальність теми полягає у важливості вдосконалення систем транспортних перевезень, зокрема шкільних автобусів, що є невід'ємною частиною ефективного функціонування освітніх закладів. Забезпечення оптимальної маршрутизації шкільних автобусів має велике значення для забезпечення безпеки та комфорту учнів, а також економічної ефективності транспортних перевезень.

Об'єкт дослідження – автоматизація маршрутизації шкільних автобусів.

Предмет дослідження – моделі, алгоритми та програмне забезпечення для розробки оптимальних маршрутів перевезення школярів в межах міста.

Новизна роботи полягає у розробці гібридного алгоритму маршрутизації на основі поєднання методів Дейкстри та 3-ОРТ з попереднім етапом кластеризації учнів алгоритмом k-means.

Практичне значення роботи визначається можливістю впровадження системи для автоматизованої оптимізації реальних маршрутів шкільних автобусів. Переваги системи:

- Інноваційний гібридний алгоритм забезпечує високу якість маршрутів.
- Врахування особливостей шкільних перевезень.
- Масштабованість для великих систем.
- Зручний інтерфейс та візуалізація маршрутів.
- Автоматизація процесу маршрутизації.

РОЗДІЛ 1

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ І ОГЛЯД АНАЛОГІВ ІСНУЮЧИХ ДОДАТКІВ ЗА ДАНОЮ ТЕМАТИКОЮ

1.1 Опис актуальності дослідження методів оптимізації транспортування шкільних автобусів

У сучасному світі, ефективне та надійне транспортування шкільних автобусів є однією з найважливіших складових безпеки та забезпечення комфорту для школярів. З урахуванням постійного зростання кількості учнів та розширення території обслуговування, виникає необхідність удосконалення методів оптимізації транспортних перевезень шкільних автобусів.

Актуальність дослідження методів оптимізації транспортування шкільних автобусів полягає у необхідності покращення ефективності та економічності цього процесу. Оптимізація планування маршрутів, врахування пасажиропотоку, дотримання встановлених графіків та інші фактори можуть сприяти зменшенню часу перевезення, витрат палива, а також покращенню безпеки та задоволення потреб учнів та їх батьків.

Для досягнення цих цілей, необхідно вивчати та аналізувати актуальні методи та підходи до оптимізації транспортування шкільних автобусів. Крім того, слід провести огляд існуючих аналогів та додатків, що використовуються у даній тематиці. Це дозволить встановити основні принципи та потенційні можливості для подальшого розроблення інформаційної системи оптимальної маршрутизації шкільних автобусів.

Ціль дослідження визначається як розробка ефективних інструментів, призначених для підтримки служб шкільного автобусного транспорту в плануванні та управлінні маршрутами. Це означає врахування специфіки регіону та потреб учнів, а також максимізацію ефективності. Успішне впровадження цієї системи може знизити витрати, покращити роботу шкільних автобусів та забезпечити безпеку учнів під час транспортування.

Задача маршрутизації шкільних автобусів передбачає визначення оптимальних маршрутів для транспортування учнів до та з школи, враховуючи різні обмеження та вимоги. Очікується, що відомі параметри будуть включати кількість автобусів, їх місткість, географічне розташування шкіл і домів учнів, а також часи початку та закінчення шкільних занять.

Основні обмеження можуть включати:

- Обмеження на максимальну кількість учнів в автобусі
- Обмеження на максимальну тривалість поїздки для учнів
- Обмеження на часи початку та закінчення занять в школі
- Обмеження на відстань від дому учня до найближчого маршруту автобуса
- Обмеження на відстань, яку учень може проїхати піше до/від автобуса

Критерії оптимальності можуть включати мінімізацію загальної тривалості поїздки, мінімізацію кількості автобусів, необхідних для перевезення всіх учнів, або мінімізацію загальної відстані, яку автобуси мають проїхати.

Варіанти задачі можуть включати стандартну задачу маршрутизації, в якій всі учні мають бути доставлені в школу до певного часу, а також більш складні варіанти, які включають різні часи початку занять для різних груп учнів, або потребу враховувати додаткові заняття або заняття після школи.

1.2 Огляд конкурентних програмних систем

З метою досягнення поставленої мети щодо оптимальної маршрутизації шкільних автобусів та розв'язання поставленої задачі, було проведено огляд існуючих аналогів та додатків, які займаються подібною тематикою.

Під час огляду були виявлені різноманітні наявні рішення, які використовуються для оптимізації транспортування шкільних автобусів. Кілька прикладів таких аналогів включають:

1. "SchoolBusTracker": Цей додаток надає можливість батькам, учням і шкільному персоналу відстежувати маршрути шкільних автобусів у режимі реального часу. Він дозволяє переглядати прогнозований час прибуття автобуса на зупинку, отримувати повідомлення про зміни в розкладі та сповіщення про прибуття автобуса до школи.

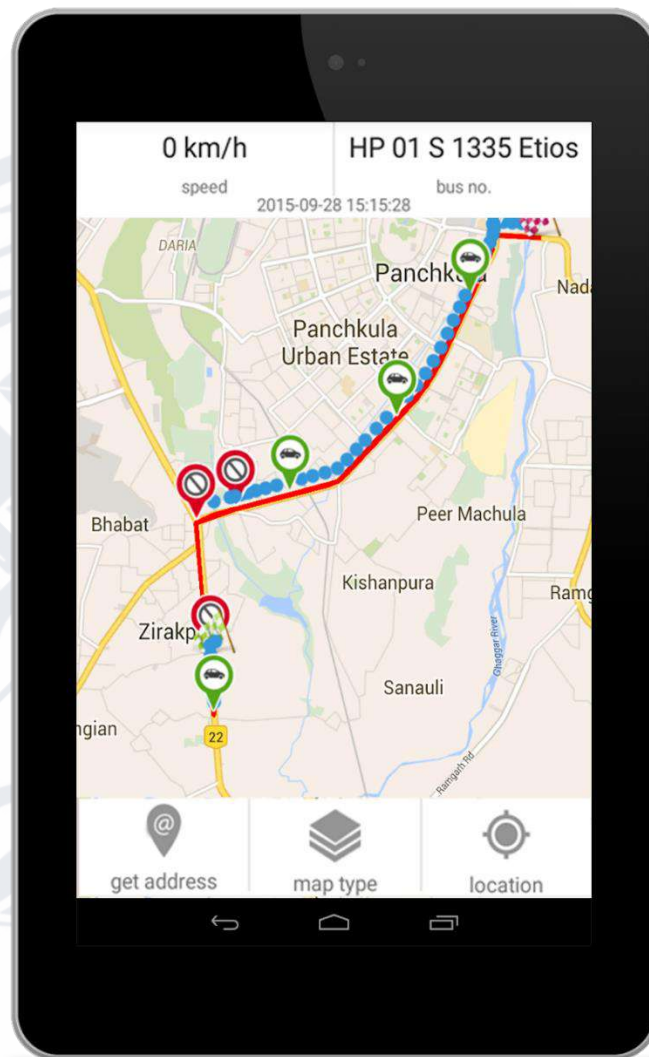


Рисунок 1.1 – [13]

2. "RoutePlannerPro": Цей додаток надає функції планування маршрутів для шкільних автобусів з урахуванням різних факторів, таких як відстань, час, кількість зупинок та вантажопідйомність. Він також враховує дорожні обмеження та трафік для забезпечення оптимальної маршрутизації.
3. "SchoolBusManager": Цей додаток надає повний контроль над маршрутами шкільних автобусів. Він дозволяє планувати маршрути, встановлювати точки зупинок, відстежувати рух автобусів та взаємодіяти з водіями. Додаток також надає можливість сповіщати батьків про прибуття та відправлення автобуса.

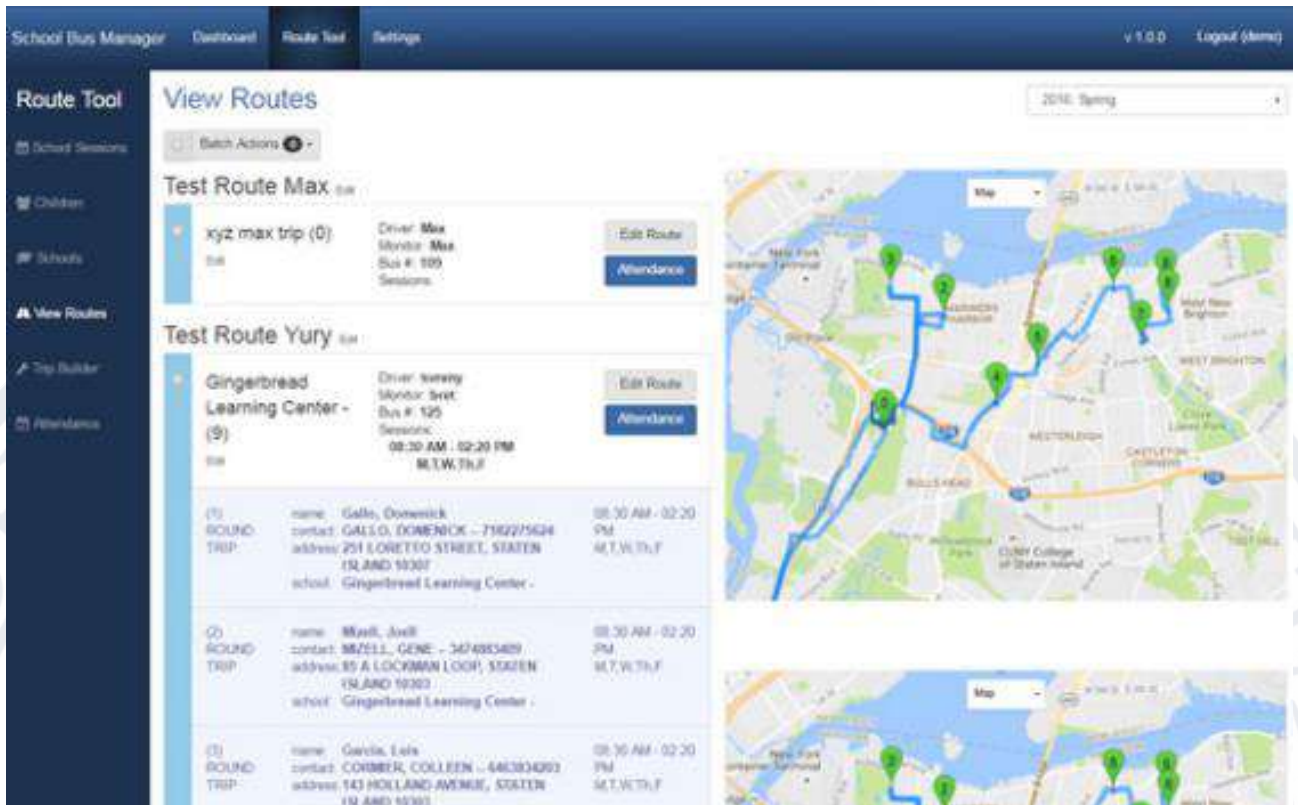


Рисунок 1.2 – [14]

Однак, виявлені аналоги мають свої обмеження та недоліки. Деякі з них можуть бути недостатньо гнучкими, не враховувати специфіку шкільних перевезень або не забезпечувати ефективного управління маршрутами та взаємодію зі зацікавленими сторонами.

Отже, проведений огляд аналогів підкреслює необхідність розробки нової інформаційної системи оптимальної маршрутизації шкільних автобусів, яка враховуватиме особливості шкільного транспорту та пропонуватиме інноваційні рішення для оптимізації процесу маршрутизації, забезпечення комунікації та моніторингу. Розробка такої системи сприятиме покращенню безпеки, ефективності та якості шкільних перевезень.

1.3 Огляд моделей та алгоритмів

У статті [1] автори Yıldız та Baykas (2018) проводять огляд методів та застосувань у вирішенні проблеми маршрутизації шкільних автобусів.

Автори розглядають різні методи та підходи до цієї проблеми, включаючи математичні моделі, еволюційні алгоритми, генетичні алгоритми та метаевристики. Вони надають огляд різних аспектів проблеми маршрутизації,

таких як обмеження на час та простір, безпека пасажирів, обмеження на ємність автобусів, вартість палива та інші фактори.

У своєму дослідженні автори порівнюють ефективність різних методів та алгоритмів за допомогою різних критеріїв, таких як довжина маршруту, кількість використаних автобусів, час розрахунку та інші показники. Вони також враховують індивідуальні вимоги та обмеження, які можуть виникати в контексті конкретної школи або місцевості.

Наукова стаття [2] авторства Dagdeviren (2018) розглядає проблему маршрутизації шкільних автобусів з урахуванням вподобань учнів за допомогою багатоцільового підходу.

Автор пропонує модель маршрутизації шкільних автобусів, в якій враховуються вимоги та вподобання учнів. Він розглядає різні фактори, такі як час посадки та висадки учнів, відстань між зупинками, тривалість маршруту та загальний час подорожі. Ці фактори враховуються як обмеження або цільові функції для забезпечення оптимального маршруту.

У своєму дослідженні автор використовує багатоцільову оптимізаційну методологію, щоб знайти компромісний розв'язок, який враховує вимоги учнів та оптимізує кілька критеріїв одночасно. Він використовує еволюційний алгоритм для пошуку ефективних рішень та пропонує варіанти оптимальних маршрутів, що задовольняють вимоги учнів.

Наукова стаття [3] від авторів Gunawan та Widodo (2020) присвячена огляду проблеми маршрутизації шкільних автобусів.

У статті розглядаються різні аспекти проблеми маршрутизації шкільних автобусів, включаючи обмеження на час, ємність автобусів, безпеку пасажирів, маршрутизацію з урахуванням природно-географічних обмежень та інші фактори. Автори проводять огляд різних методів та підходів, які були використані для вирішення цієї проблеми, включаючи математичне програмування, метаевристики, генетичні алгоритми та інші оптимізаційні методи.

Стаття також надає приклади застосування різних методів маршрутизації шкільних автобусів у реальних ситуаціях. Вона враховує різні контексти, такі

як географічні особливості та розмір міста, і розглядає вплив цих факторів на вибір оптимальних маршрутів.

Наукова стаття [4] авторства Zhang та Yang (2020) пропонує багатоцільову стохастичну модель для задачі маршрутизації шкільних автобусів.

Автори враховують невизначеність попиту на шкільні автобуси та пропонують стохастичну оптимізаційну модель з двома цільовими функціями: мінімізацією загальної відстані та максимізацією надійності обслуговування.

Модель оптимізує розподіл ресурсів, маршрути та розклади з урахуванням ймовірного попиту. Проведено чисельні експерименти на тестових даних для оцінки ефективності запропонованої моделі.

Наукова стаття [5] авторства Rau, Chen та Shih (2015) пропонує гібридний алгоритм для вирішення задачі маршрутизації шкільних автобусів.

Автори поєднують метод гілок та меж, евристичний алгоритм та процедуру локального пошуку. Метод гілок та меж використовується для генерації можливих маршрутів з урахуванням обмежень. Евристичний алгоритм відповідає за призначення автобусів до маршрутів. Процедура локального пошуку оптимізує отримане рішення.

Автори тестують алгоритм на реальних та синтетичних даних. Результати показують перевагу запропонованого гібридного підходу у порівнянні з іншими евристичними та точними методами за показниками якості розв'язку та часу обчислень.

У статті [6] автори Fang та Wu (2018) досліджують задачу маршрутизації шкільних автобусів з нечіткими часовими вікнами.

Автори пропонують модель з нечіткими часовими вікнами, де час прибуття та відправлення на зупинках задається у вигляді нечітких інтервалів. Це дозволяє врахувати невизначеність, пов'язану з дорожніми умовами. Для розв'язання задачі застосовується алгоритм пошуку з табу-пошуком. Експериментальні результати на тестових даних підтверджують ефективність запропонованого підходу.

У книзі [7] Goldberg D.E. (1989) розглядаються генетичні алгоритми та їх застосування для оптимізації та машинного навчання.

Автор детально описує методологію та механізми роботи генетичних алгоритмів, включаючи кодування розв'язків, формування початкової популяції, генетичні оператори схрещування, мутації та селекції. Наводяться приклади застосування генетичних алгоритмів для оптимізації в різних предметних областях.

Робота є фундаментальним джерелом для дослідників та практиків, які цікавляться методами оптимізації на основі генетичних алгоритмів та їх використанням для вирішення складних задач, зокрема задачі маршрутизації шкільних автобусів.

У статті [8] автори Dantzig та Ramser (1959) вперше формалізували класичну задачу маршрутизації автомобілів (VRP) та запропонували математичну модель її розв'язання.

Автори вводять поняття "вузлова мережа" для представлення топології маршрутів та формулюють задачу як задачу цілочисельного програмування. Запропонований підхід став основоположним для подальших досліджень VRP та розробки ефективних методів її розв'язання.

Робота є класичною та широко цитується в літературі з транспортної логістики та дослідження операцій. Вона має фундаментальне значення для вивчення та розробки моделей і алгоритмів маршрутизації шкільних автобусів.

У статті [9] автори Laporte, Mercure та Nobert (1986) пропонують точний алгоритм для вирішення задачі маршрутизації шкільних автобусів.

Алгоритм базується на методі гілок та меж і використовує ряд евристик для скорочення перебору. Автори формулюють математичну модель задачі та проводять обчислювальні експерименти на реальних тестових даних.

Робота показує, що задача маршрутизації шкільних автобусів може бути ефективно розв'язана точними алгоритмами оптимізації для практичних розмірів даних. Це важливий результат, який ліг в основу подальших досліджень з використання точних та евристичних методів.

У книзі [10] автори Toth та Vigo (2002) узагальнюють знання та проводять систематизацію методів вирішення задачі маршрутизації автомобілів (VRP).

Автори класифікують різні варіації VRP, аналізують складність задачі та можливі підходи до її розв'язання. Детально розглядаються точні алгоритми, евристики та метаевристики. Наводиться велика кількість прикладів та тестових задач.

Книга є надзвичайно цінним довідковим джерелом з теорії та практичних аспектів розв'язання різних класів задач маршрутизації, в тому числі задачі оптимальної маршрутизації шкільних автобусів.

У главі [11] автори Cordeau et al. (2007) систематизують різноманітні формулювання та алгоритми для класичної задачі маршрутизації автомобілів.

Автори класифікують VRP моделі, наводять їх математичні формулювання, обговорюють переваги та недоліки. Детально аналізуються точні алгоритми, евристики та метаевристики для VRP. Окрема увага приділяється практичним аспектам впровадження та інтеграції з інформаційними системами.

Розділ є корисним довідковим матеріалом для дослідників та практиків, що цікавляться застосуванням сучасних алгоритмічних методів для вирішення задач маршрутизації, зокрема шкільних автобусів.

У статті [12] автори Bräysy та Gendreau (2005) досліджують алгоритми для VRP з часовими вікнами.

Автори пропонують декомпозиційний підхід, який розбиває задачу на дві підзадачі: побудову маршрутів та локальний пошук оптимального розв'язку. Для побудови маршрутів використовується метод включення, а для локального пошуку - процедури 2-opt, 1-shift та CROSS-exchange.

Експериментальні результати демонструють ефективність запропонованого підходу для вирішення практичних задач маршрутизації з часовими обмеженнями, що є корисним для застосування в контексті шкільних перевезень.

Ось огляд основних методів кластеризації та їх застосування для групування учнів по автобусам:

- K-means - це один з найпопулярніших алгоритмів кластеризації. Він розбиває дані на K кластерів, мінімізуючи внутрішньокластерну дисперсію. Для групування учнів K можна встановити рівним кількості автобусів. Алгоритм ефективний, але чутливий до викидів.
- Ієрархічна кластеризація послідовно об'єднує або розбиває дані на кластери. Може бути використана для поступового формування груп учнів з урахуванням місткості автобусів. Недолік - висока обчислювальна складність.
- DBSCAN - алгоритм щільнісної кластеризації, який виділяє щільні скупчення точок даних. Може використовуватися для виділення груп учнів, що проживають поруч. Не вимагає заздалегідь заданої кількості кластерів.
- Кластеризація за середніми значеннями (k-medoids) схожа на k-means, але використовує реальні дані як центри кластерів замість усереднених точок. Менш чутлива до викидів.
- Методи на основі щільності, такі як OPTICS та DBSCAN, можуть виділяти кластери різної форми та розміру на основі розподілу щільності даних. Корисно при наявності різномірних кластерів.
- Кластеризація на графах дозволяє враховувати зв'язки та відносини між об'єктами. Може застосовуватися в ситуаціях, коли учнів потрібно групувати з урахуванням дружніх стосунків.

Отже, існує широкий спектр методів кластеризації, які можна ефективно застосувати для групування учнів на автобуси з урахуванням різних факторів та особливостей даних.

У цьому підрозділі було наведено огляд сучасних наукових досліджень, присвячених моделям та алгоритмам для задачі оптимальної маршрутизації шкільних автобусів.

Розглянуті роботи охоплюють широке коло підходів, включаючи точні методи, евристики, метаевристики, стохастичне програмування та машинне навчання. Дослідження спрямовані на врахування різноманітних аспектів задачі маршрутизації шкільних автобусів, таких як часові обмеження, безпека, ємність автобусів, вподобання учнів тощо.

Аналіз існуючих розробок дозволяє визначити основні напрямки для подальших досліджень та розвитку моделей і алгоритмів з метою створення ефективної інформаційної системи для оптимального планування маршрутів шкільних автобусів. Отримані результати будуть використані в подальших розділах магістерської роботи.

1.4 Деталізація завдань розробки

З метою покращення ефективності та безпеки транспортування школярів, ставиться завдання розробки інформаційної системи оптимальної маршрутизації шкільних автобусів. Головною метою даної роботи є розроблення та впровадження інноваційного рішення, яке допоможе оптимізувати процес планування та вибору маршрутів для шкільних автобусів, забезпечуючи оптимальне використання ресурсів та задоволення потреб перевезення учнів.

Поставлені перед інформаційною системою оптимальної маршрутизації шкільних автобусів задачі включають:

1. Розробку алгоритмів та математичних моделей для оптимального планування маршрутів шкільних автобусів з урахуванням різних факторів, таких як довжина маршруту, час посадки та висадки учнів, вузькі ділянки доріг тощо. Це дозволить зменшити час перевезення, використання палива та забезпечити оптимальний розподіл ресурсів.
2. Розробку інтерфейсу та функціоналу інформаційної системи, що дозволить зручно та ефективно вводити та оновлювати дані про учнів, школи, графіки руху автобусів та інші необхідні параметри. Це забезпечить зручну роботу з системою та точність введених даних.
3. Реалізацію аналітичних інструментів та звітності, які допоможуть аналізувати та вдосконалювати роботу системи, враховуючи змінні умови, наприклад, зміни в потребах учнів, дорожніх умовах чи

графіках навчальних закладів. Це дозволить забезпечити постійний моніторинг та вдосконалення системи для оптимальної маршрутизації шкільних автобусів.

Виконання поставлених завдань дозволить покращити ефективність та безпеку транспортування школярів, сприятиме зменшенню витрат, поліпшенню планування та вибору маршрутів, а також забезпечить більш задоволені потреби учнів та їх батьків у перевезенні.

Після глибокого аналізу різних моделей та алгоритмів, присвячених оптимізації маршрутів, можна зробити декілька ключових висновків.

1. Моделі та алгоритми оптимізації маршрутів мають величезний потенціал для підвищення ефективності та економічної доцільності систем транспортування, зокрема шкільних автобусів. Використання даних моделей та алгоритмів може допомогти в рішенні викликів, пов'язаних з плануванням маршрутів, зменшенням витрат на паливо та покращенням загальної ефективності транспортних систем.
2. Вивчені моделі та алгоритми включають у себе широкий спектр методів, від традиційного математичного моделювання до більш сучасних підходів, заснованих на машинному навчанні та оптимізації. Це підкреслює необхідність вибору правильного інструменту для конкретної задачі.
3. Водночас, не існує "одного рішення для всіх" у контексті оптимізації маршрутів. Кожна ситуація має свої власні особливості та виклики, які вимагають індивідуального підходу та налаштування моделей та алгоритмів.
4. Зважаючи на швидкість розвитку технологій, постійне оновлення та вдосконалення існуючих моделей та алгоритмів є важливим для забезпечення їх актуальності та ефективності.

Висновок до розділу 1

У даному розділі було встановлено мету розробки інформаційної системи для оптимальної маршрутизації шкільних автобусів з метою покращення ефективності та безпеки перевезення учнів. Були визначені основні завдання,

які перед цією системою стоять, зокрема розробка алгоритмів та математичних моделей для планування оптимальних маршрутів, створення зручного інтерфейсу та функціоналу системи, а також розробка аналітичних інструментів для подальшого вдосконалення.

Також був проведений огляд існуючих додатків та програм, що використовуються для оптимізації транспортування шкільних автобусів. Цей огляд дозволив виявити переваги та недоліки наявних рішень та визначити потенційні можливості для подальшого вдосконалення.

Отже, розробка інформаційної системи для оптимальної маршрутизації шкільних автобусів є актуальним завданням, яке спрямоване на вирішення проблем ефективності та безпеки перевезення учнів. Дослідження та впровадження нових алгоритмів, функціоналу та аналітичних інструментів сприятиме оптимізації процесу маршрутизації та покращенню якості транспортного обслуговування школярів.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ МАРШРУТИЗАЦІЇ ШКІЛЬНИХ АВТОБУСІВ

2.1 Формалізація задачі маршрутизації шкільних автобусів

Послідовність відвідування точок

Це змінна, яку можна керувати, визначаючи послідовність, в якій автобуси відвідують зупинки та школу. Вона впливає на загальний час подорожі та ефективність маршруту.

Вибір автобусу для маршруту

Залежно від вантажопідйомності автобуса та кількості учнів, які потрібно перевезти, можна вибрати відповідний автобус для кожного маршруту.

Час відправлення автобусів

Початковий час відправлення кожного автобуса може бути регульований, щоб оптимізувати рух автобусів та уникнути зайвих затримок.

Кількість маршрутів

Кількість маршрутів, які створюються для перевезення учнів, також може бути керована. Це дозволяє розподілити навантаження між різними автобусами та оптимізувати використання ресурсів.

Ці керовані змінні дозволяють добиватися більшої гнучкості та ефективності в процесі планування маршрутів шкільних автобусів, що робить систему більш адаптивною до різних ситуацій.

Обмеження для системи оптимальної маршрутизації шкільних автобусів включають:

Обмеження часу руху:

Кожен маршрут повинен враховувати обмеження часу, яке визначає максимальний час руху для кожного автобуса. Це гарантує, що автобуси прибувають та відправляються вчасно.

Максимальна відстань маршруту:

Обмеження на максимальну відстань, яку може пройти автобус протягом одного маршруту. Забезпечує ефективне використання палива та ресурсів.

Максимальна кількість учнів на автобусі:

Обмеження вантажопідйомності кожного автобуса, щоб забезпечити безпеку та комфорт перевезення учнів.

Зона шкільного обслуговування:

Межі зони обслуговування кожної школи. Маршрути повинні залишатися всередині цих меж для забезпечення ефективного та своєчасного перевезення учнів.

Врахування дорожніх обмежень:

Обмеження, пов'язані з дорожніми роботами, тимчасовими перешкодами та іншими факторами, що можуть впливати на маршрут. Система повинна уникати таких областей чи враховувати їх при плануванні.

Обмеження на кількість зупинок:

Максимальна кількість зупинок на одному маршруті. Забезпечує оптимальний час поїздки та уникнення надмірного затримання.

Графік руху автобусів:

Обмеження, пов'язані з графіком руху автобусів, щоб уникнути конфліктів та перекриття маршрутів.

Ці обмеження визначають рамки для оптимізації маршрутів, забезпечуючи ефективне та безпечне перевезення школярів.

Критерій оптимальності в системі оптимальної маршрутизації шкільних автобусів може бути сформульований на основі кількох ключових факторів:

Мінімізація часу подорожі:

Одним з основних критеріїв може бути мінімізація часу, який витрачається на подорож. Це включає в себе час відправлення та прибуття, а також час, що витрачається на кожну зупинку.

Мінімізація відстані:

Якщо важлива економія пального та ресурсів, критерій може бути спрямований на мінімізацію відстані, яку проходять автобуси.

Максимізація ефективності розкладу:

Критерій може орієнтуватися на максимізацію ефективності розкладу, забезпечуючи регулярні та точні прибуття та відправлення автобусів.

Мінімізація кількості зупинок:

Якщо важлива швидкість маршруту, можливий критерій мінімізації кількості зупинок, щоб зменшити час подорожі.

Оптимальне використання ресурсів:

Критерій може враховувати оптимальне використання ресурсів, таких як паливо, автобуси та інші матеріальні ресурси.

Забезпечення рівномірного навантаження:

Критерій може враховувати рівномірне розподілення учнів між різними автобусами для забезпечення комфортної поїздки.

Ці критерії можуть бути ваговими, залежно від конкретних вимог та пріоритетів системи. Важливо балансувати різні аспекти для досягнення оптимальних результатів.

Цільова функція в системі оптимальної маршрутизації шкільних автобусів може бути сформульована з урахуванням вагових коефіцієнтів для кожного з критеріїв. Давайте розглянемо можливу цільову функцію на основі зазначених критеріїв:

$$F = w_1 \cdot \text{час_подорожі} + w_2 \cdot \text{відстань} + w_3 \cdot \text{ефективність_розкладу} + w_4 \cdot \text{кількість_зупинок} + w_5 \cdot \text{використання_ресурсів} + w_6 \cdot \text{рівномірне_навантаження}$$

де:

- w_1, w_2, \dots, w_6 - вагові коефіцієнти, які визначають важливість кожного з критеріїв.

- час_подорожі, відстань, ефективність_розкладу, кількість_зупинок, використання_ресурсів, рівномірне_навантаження - значення, що представляють відповідні критерії.

Ця цільова функція враховує різні аспекти маршрутизації та намагається знайти баланс між ними з урахуванням пріоритетів, встановлених ваговими коефіцієнтами.

2.2 Математичні Моделі Маршрутизації

Для планування оптимальних маршрутів шкільних автобусів можна використовувати математичні моделі, які враховують різні фактори і критерії. Основні складові математичної моделі можуть включати:

1. Граф маршрутів: Представлення мережі доріг та зупинок у вигляді графа, де вузли - це зупинки, а ребра - дороги між ними. Ваги ребер можуть відображати відстані або час подорожі між зупинками.
2. Функція вартості: Для кожного ребра графа може бути визначена функція вартості, яка враховує різні параметри, такі як відстань, час подорожі, трафік, наявність дорожніх обмежень тощо.
3. Критерії оптимізації: Визначення об'єктивів оптимізації, таких як мінімізація часу подорожі, відстані, кількість зупинок, витрат пального або вартості маршруту.
4. Умови обмежень: Встановлення обмежень, таких як час роботи водія, максимальна кількість учнів у автобусі, обмеження швидкості, урахування шкільного графіка тощо.

5. Модель вибору маршруту: Розробка моделі, яка визначає процес вибору конкретного маршруту з урахуванням вагових коефіцієнтів та обмежень.

Процес оптимізації може використовувати різні алгоритми, такі як генетичні алгоритми, алгоритми імітації відпалу, жадібні алгоритми тощо, для знаходження оптимального рішення враховуючи складність завдання та обмеження.

Врахування різних факторів у математичній моделі для оптимального планування маршрутів шкільних автобусів є важливим для досягнення ефективності та точності результатів. Додаткові фактори можуть включати:

1. Довжина маршруту: Врахування фактора відстані між зупинками та загальної довжини маршруту. Це допомагає у мінімізації часу та витрат пального.
2. Час посадки та висадки учнів: Визначення часу, необхідного для посадки та висадки учнів на кожній зупинці, що впливає на загальний час подорожі.
3. Вузькі ділянки доріг: Врахування ускладнених ділянок доріг або обмежень, які можуть виникнути через ремонт чи будівництво.
4. Шкільний графік: Синхронізація маршрутів зі шкільним графіком для мінімізації затримок та відповідності розкладу.
5. Врахування трафіку: Можливість урахування інформації про трафік у реальному часі для оптимізації маршрутів та уникнення заторів.
6. Обмеження вантажопідйомності автобуса: Врахування максимальної кількості учнів, яких може вмістити автобус, для забезпечення безпеки та комфорту перевезення.

Врахування цих факторів в математичній моделі дозволяє створювати більш реалістичні та оптимальні маршрути для шкільних автобусів, сприяючи ефективності та задоволенню всіх учасників процесу.

Доповнення математичної моделі задачі етапом кластеризації учнів відповідно до місткості автобусів:

1. Позначимо:

- n - кількість учнів
- k - кількість автобусів
- c_i - місткість i -го автобуса
- x_{ij} - бінарна змінна, що дорівнює 1, якщо j -й учень віднесений до i -го автобуса

2. Етап кластеризації учнів:

Ціль: розбити множину учнів $\{1, 2, \dots, n\}$ на k кластерів відповідно до місткості автобусів $\{c_1, c_2, \dots, c_k\}$.

Обмеження:

- $\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq c_i, \forall i = 1, \dots, k$ (кількість учнів в кожному кластері не перевищує місткість відповідного автобуса)
- $\sum_{i=1}^k x_{ij} = 1, \forall j = 1, \dots, n$ (кожен учень відноситься лише до одного кластера)

Цільова функція:

- мінімізувати суму відстаней всередині кластерів або
- максимізувати суму відстаней між центрами кластерів

Таким чином математична модель доповнюється етапом попередньої кластеризації учнів з метою розподілу їх по автобусах відповідно до місткості та інших критеріїв оптимальності.

2.3 Розробка Алгоритмів Маршрутизації

Для розв'язання задачі маршрутизації шкільних автобусів застосовують різні алгоритми, спрямовані на оптимізацію різних критеріїв. Ось кілька конкретних алгоритмів, які можуть використовуватися у такій системі:

Алгоритм Дейкстри

Опис: Алгоритм Дейкстри використовується для знаходження найкоротших шляхів в графах з невід'ємними вагами ребер. У випадку

маршрутизації шкільних автобусів, вагами можуть бути відстані між зупинками або часи подорожі.

Генетичні алгоритми

Опис: Генетичні алгоритми використовують еволюційний підхід для знаходження оптимальних рішень. Популяція маршрутів змінюється та еволюціонує через різні покоління, оптимізуючи вагу фітнес-функції, яка може включати в себе вартість, час та інші критерії.

Алгоритми локального пошуку

Опис: Ці алгоритми вдосконалюють існуючий маршрут шляхом локальних змін, таких як додавання, видалення або переміщення зупинок. Локальні зміни робляться з метою поліпшення маршруту відносно обраного критерію.

Методи групової оптимізації

Опис: Методи, які орієнтовані на оптимізацію групи маршрутів, а не окремих. Наприклад, маршрути можуть об'єднуватися, якщо є спільні зупинки чи проміжні ділянки.

Методи навчання з учителем

Опис: Використання методів машинного навчання для аналізу історичних даних маршрутів та швидкого навчання системи вибору оптимальних маршрутів.

Вибір конкретного алгоритму залежить від специфіки задачі, обраного критерію оптимальності, обмежень та обраного підходу до розв'язання проблеми. Комбінація різних алгоритмів може також бути використана для досягнення бажаних результатів.

Особливості шкільних перевезень та умови вимагають специфічних підходів при виборі та розробці алгоритмів для оптимізації маршрутів шкільних автобусів. Розглянемо деякі особливості, які можна врахувати:

Часові обмеження

Опис: Робочий день школи має чітко визначений графік, тому важливо враховувати часові обмеження при плануванні маршрутів. Це включає точний час початку та закінчення перевезень, а також час посадки та висадки учнів.

Безпека

Опис: Забезпечення безпеки учнів - пріоритет. Врахування безпечних маршрутів, уникаючи небезпечних доріг або ділянок, може бути важливим аспектом оптимізації.

Зони шкільного доступу

Опис: Визначення зон, які обслуговує конкретна школа, та врахування цих зон при плануванні маршрутів для ефективного та точного доставлення учнів.

Структура маршруту

Опис: Врахування ієрархії зупинок (початкова, проміжні, кінцева) та їхнього впливу на загальний час подорожі та організацію руху автобусів.

Сезонні аспекти

Опис: Деякі маршрути можуть змінюватися в залежності від сезону (наприклад, під час канікул або зимових канікул).

Кількість учнів

Опис: Розрахунок вантажопідйомності автобусів, щоб максимізувати кількість учнів, яких можна перевезти одночасно, з урахуванням безпеки та комфорту.

2.4 Аналіз ефективності моделей та алгоритмів

Оцінка ефективності запропонованих моделей та алгоритмів для оптимізації маршрутів шкільних автобусів важлива для підтвердження їхньої працездатності та придатності для практичного використання. Для цього можна провести ряд експериментів та аналізів.

Час виконання:

Мета: Виміряти час, необхідний для оптимізації маршрутів для певної кількості автобусів та зупинок.

Методика: Заміряти час роботи алгоритму на різних обсягах даних та порівнювати його з часом роботи аналогічних систем.

Ефективність маршруту:

Мета: Оцінити ефективність маршрутів, згенерованих системою, з точки зору мінімізації часу подорожі та відстані.

Методика: Порівнювати згенеровані маршрути з ручно складеними або існуючими маршрутами, враховуючи різні показники, такі як загальний час подорожі, кількість зупинок, загальна відстань.

Вантажопідйомність:

Мета: Перевірити, наскільки ефективно використовується вантажопідйомність автобусів.

Методика: Визначати середню та максимальну вантажопідйомність автобусів після оптимізації та порівнювати це з даними перед оптимізацією.

Вартість маршруту:

Мета: Оцінити витрати на паливо та інші ресурси для згенерованих маршрутів.

Методика: Розраховувати вартість маршруту на основі витрат на паливо, знос автобусів та інші експлуатаційні витрати.

Задоволення від користувача:

Мета: Оцінити ступінь задоволення від користувачів, таких як водії шкільних автобусів та батьки учнів.

Методика: Проводити опитування та отримувати відгуки від користувачів щодо зручності та ефективності нової системи.

Виконання цих оцінок дозволить підтвердити переваги та ефективність запропонованих моделей та алгоритмів для оптимізації маршрутів шкільних автобусів.

Оцінювання ефективності моделей та алгоритмів:

1. Алгоритм Дейкстри:

- **Переваги:**

- Простий та легко зрозумілий.
- Гарантує знаходження найкоротшого шляху в графі з невід'ємними вагами ребер.
- Може використовуватися для знаходження найкоротших маршрутів в реальному часі.

- **Недоліки:**

- Ефективний тільки для графів без циклів та з невід'ємними вагами.
- Непрактичний для великих графів через високий обчислювальний витрати.
- Не враховує зміни в умовах дорожнього руху чи інших факторів.

2. Генетичні алгоритми:

• Переваги:

- Добре справляються з оптимізацією у складних просторах пошуку.
- Здатні враховувати та оптимізувати багатофакторні критерії.
- Ідеальні для задач оптимізації, де розв'язок може бути представлений як послідовність.

• Недоліки:

- Не завжди гарантують знаходження глобально оптимального розв'язку.
- Потребують налаштувань параметрів, які можуть бути нетривіальними.
- Часом можуть працювати повільно при великих об'ємах даних.

3. Алгоритми локального пошуку:

• Переваги:

- Швидкі та прості в реалізації.
- Здатні знаходити локально оптимальні розв'язки.
- Ефективні при великих об'ємах даних.

• Недоліки:

- Застрагають у локальних мінімумах або максимумах.
- Не гарантують глобально оптимальний результат.
- Чутливі до початкового наближення.

4. Методи групової оптимізації:

- **Переваги:**
 - Здатні вирішувати складні задачі оптимізації за рахунок колективного інтелекту.
 - Гнучкі та адаптивні до змінюючихся умов.
- **Недоліки:**
 - Можуть бути витратними з обчислювальної точки зору.
 - Вимагають великої кількості ітерацій.

5. Методи навчання з учителем:

- **Переваги:**
 - Здатні враховувати складні взаємодії між різними факторами.
 - Мають високу точність при правильному використанні та належному тренуванні.
- **Недоліки:**
 - Вимагають великої кількості позначених даних для тренування.
 - Чутливі до перенавчання та можуть погано узагальнювати на нові дані.

Кожен з цих алгоритмів має свої переваги та недоліки, і їхній вибір залежить від конкретного контексту та вимог системи маршрутизації для шкільних автобусів.

Порівняння їхньої продуктивності та точності:

1. Алгоритм Дейкстри:

- *Продуктивність:*
 - Швидкий для невеликих графів, але значно сповільнюється зі збільшенням розміру графа.
- *Точність:*

- Точно знаходить найкоротший шлях для графів з невід'ємними вагами.

2. Генетичні алгоритми:

- *Продуктивність:*
 - Сприйнятливий до об'єктивної функції та розміру популяції.
- *Точність:*
 - Здатний досягати глобально оптимального розв'язку, але може застрягати в локальних оптимумах.

3. Алгоритми локального пошуку:

- *Продуктивність:*
 - Швидкі, особливо для великих об'ємів даних.
- *Точність:*
 - Здатні знаходити локально оптимальні розв'язки.

4. Методи групової оптимізації:

- *Продуктивність:*
 - Залежить від числа агентів та структури взаємодії.
- *Точність:*
 - Здатні вирішувати складні задачі, але швидше за все надають наближені розв'язки.

5. Методи навчання з учителем:

- *Продуктивність:*
 - Вимагають великої кількості даних для тренування та обчислювальних ресурсів.
- *Точність:*
 - Можуть мати високу точність при належному тренуванні, але чутливі до перенавчання.

Для розбиття учнів на кластери відповідно до місткості автобусів використовується алгоритм k-means. Цей метод дозволяє ефективно розділити дані на задану кількість кластерів k , що відповідає кількості автобусів.

Алгоритм працює наступним чином:

1. Випадковим чином вибираються k центроїдів кластерів з множини даних (учнів).
2. Кожен учень відноситься до найближчого центроїду, формуючи кластери. Відстань обчислюється на основі координат місця проживання.
3. Розраховується середнє значення (центроїд) для кожного кластеру.
4. Учні знову розподіляються між центроїдами кластерів на основі мінімальної відстані.
5. Кроки 3-4 повторюються, поки центроїди кластерів не перестануть змінюватися.
6. Коли алгоритм збігається, учні розподілені по k кластерам, що відповідають автобусам.

Такий підхід дозволяє швидко та ефективно розділити учнів на групи відповідно до заданого параметру k , що відображає кількість доступних автобусів.

Загальні висновки:

- Для маленьких систем маршрутизації з невеликим числом точок маршруту та обмеженим обсягом даних може бути вигідним використання алгоритму Дейкстри з простотою та швидкістю.
- У випадку складних та громадських систем генетичні алгоритми та методи групової оптимізації можуть надати більш точний результат.
- Для швидкого реагування на зміни умов маршрутів алгоритми локального пошуку можуть бути ефективними.

- Методи навчання з учителем можуть бути потужними у вирішенні задач, якщо є достатньо великий обсяг позначених даних для тренування.

2.4 Інші важливі аспекти

1. Безпека:

- Важливо розглядати аспекти безпеки даних та конфіденційності, оскільки система працює з геолокаційними даними та інформацією про маршрути учнів.

2. Масштабованість:

- Потрібно передбачити можливість масштабування системи для врахування зростання кількості автобусів, шкіл та учнів.

3. Зручність та Інтерфейс:

- Важливо мати зручний інтерфейс для користувачів, таких як адміністратори та водії автобусів, щоб полегшити роботу та взаємодію з системою.

4. Моніторинг та Звітність:

- Включення функцій моніторингу та звітності дозволить відслідковувати ефективність системи та робити аналіз результатів.

5. Мобільні Додатки:

- Розгляд можливості створення мобільних додатків для батьків, учнів та водіїв для зручного доступу до інформації та отримання сповіщень.

6. Інтеграція з Іншими Системами:

- Важливо врахувати можливість інтеграції системи з іншими шкільними системами, такими як система обліку учнів чи електронний журнал.

7. Оновлення та Підтримка:

- Забезпечення регулярних оновлень системи для врахування нових вимог та забезпечення довготривалої підтримки.

8. Екологічні Аспекти:

- Врахування можливостей для оптимізації маршрутів з екологічною точки зору для зменшення викидів та сприяння сталому розвитку.

9. Освітні Програми:

- Розгляд інтеграції системи з освітніми програмами, що можуть поліпшити процеси навчання та забезпечити додаткові можливості для учнів.

10. Легкість Використання:

- Система повинна бути легкою у використанні для всіх користувачів без необхідності великої підготовки.

Ці аспекти важливі для того, щоб система була не лише функціональною, а й практичною та корисною для всіх зацікавлених сторін.

Висновок до розділу 2

У другому розділі було проведено ретельний аналіз та формалізація задачі оптимальної маршрутизації шкільних автобусів. Описано моделі та алгоритми, які визначають взаємодію системи з користувачем та визначають оптимальні маршрути.

Опис керованих змінних, встановлення обмежень, визначення критерію оптимальності та формулювання цільової функції створюють теоретичний фундамент для розробки системи. Опис математичних моделей надає загальний вигляд на задачу та її складові.

Детально розглянуто врахування різних факторів, таких як довжина маршруту, час посадки та висадки учнів, вузькі ділянки доріг, інші важливі аспекти та алгоритми, які допомагають врахувати специфіку шкільних перевезень та умов.

У подальших підрозділах буде детально розглянуто реалізацію вибраних моделей та алгоритмів, що дозволить провести практичне вивчення їх ефективності та точності. Це є важливим етапом в розробці системи оптимальної маршрутизації для шкільних автобусів.

РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ

3.1 Технічні засади реалізації

Опис мови програмування:

Для реалізації інформаційної системи оптимальної маршрутизації шкільних автобусів використовується мова програмування JavaScript. JavaScript є високорівневою, інтерпретованою мовою, яка широко використовується для розробки веб-додатків. Однією з ключових особливостей JavaScript є його спрощена синтаксична конструкція, що полегшує розробку та відладку коду.

JavaScript є мовою, яка виконується в середовищі браузера, що робить її ідеальним вибором для веб-розробки. Використання JavaScript також дозволяє створювати динамічні та інтерактивні елементи веб-сторінок, що важливо для користувацького інтерфейсу інформаційної системи.

JavaScript має велику кількість бібліотек та фреймворків, що полегшують розробку та надають доступ до різноманітних інструментів. У конкретній реалізації використовуються бібліотеки Leaflet та Leaflet Routing Machine для взаємодії з картою та побудови оптимальних маршрутів.

JavaScript дозволяє здійснювати взаємодію з користувачем у реальному часі та ефективно використовувати можливості веб-технологій для досягнення поставлених цілей щодо оптимальної маршрутизації шкільних автобусів.

У розробці системи для оптимальної маршрутизації шкільних автобусів було використано ряд технологій та інструментів для ефективної та інноваційної реалізації функціоналу.

OpenStreetMap: Для отримання географічних координат за адресою використовувався сервіс геокодування Nominatim. OpenStreetMap, як вільно доступна база геоданих, забезпечила детальну та актуальну інформацію про дороги, міста та інші об'єкти, що є критичним для ефективної маршрутизації.

Leaflet: Для відображення та взаємодії з картою веб-сайту використовувався Leaflet. Ця бібліотека надає простий та гнучкий інтерфейс для інтеграції карт у веб-додатки.

HTML та CSS: Основні мови розмітки та стилізації веб-сайту. HTML використовувався для створення структури сторінки, а CSS — для надання їй привабливого та зручного вигляду.

Nominatim: Сервіс геокодування Nominatim використовувався для отримання географічних координат за адресою. Він надає широкий функціонал і точні результати геокодування.

Leaflet Routing Machine: Для виконання маршрутизації була використана бібліотека Leaflet Routing Machine, яка надає зручний інтерфейс для побудови та відображення оптимальних маршрутів на картах.

Ці технології були обрані через їхню відкритість, гнучкість та широкі можливості, які вони надають для розробки веб-додатків з географічним компонентом.

У процесі розробки системи для оптимальної маршрутизації шкільних автобусів вибір фреймворку було визначено на користь використання Leaflet та Leaflet Routing Machine. Ось основні обґрунтування цього вибору:

Leaflet: Leaflet є легким, гнучким та ефективним фреймворком для відображення інтерактивних карт у веб-додатках. Він простий у використанні та має велику спільноту, що робить його ідеальним вибором для реалізації компоненту картографії в проекті.

Leaflet Routing Machine: Цей плагін для Leaflet спеціально призначений для маршрутизації, і він інтегрується непереписно з Leaflet. Leaflet Routing Machine надає можливість побудови маршрутів та взаємодії з ними, включаючи додавання точок маршруту, оптимізацію, видалення точок, тощо. Його обґрунтоване використання полягає в тому, що він доповнює Leaflet і надає зручний інтерфейс для роботи з маршрутами.

Використання Leaflet та Leaflet Routing Machine дозволяє легко інтегрувати функціональність маршрутизації та відображення маршрутів у веб-додаток, забезпечуючи при цьому ефективну та зручну для користувача систему.

Геокодувальний сервіс Nominatim:

Вибір геокодувального сервісу Nominatim для отримання географічних координат за адресою обумовлено кількома чинниками:

- **Безкоштовність та відкритість:** Nominatim є відкритим сервісом, який надається безкоштовно. Це дозволяє використовувати його в проекті без необхідності платити за доступ до геоданих.
- **Інтеграція з OpenStreetMap:** Nominatim пов'язаний з проектом OpenStreetMap (OSM), який також є відкритим та безкоштовним джерелом геоданих. Використання Nominatim дозволяє легко і безперешкодно інтегруватися з іншими даними з OSM.
- **Гнучкість і точність:** Nominatim має гнучкі налаштування та можливості вибору. Він надає точні результати геокодування та враховує різні мови та формати адрес.

Мапова бібліотека Leaflet:

Вибір мапової бібліотеки Leaflet обумовлений наступними факторами:

- **Легкість використання:** Leaflet - це легка та інтуїтивно зрозуміла бібліотека для роботи з інтерактивними картами. Її інтерфейс простий, що робить її ідеальним вибором для веб-додатків.
- **Екосистема плагінів:** Leaflet має багатий набір плагінів, що розширюють його можливості. Leaflet Routing Machine - це один із таких плагінів, який надає зручні засоби для роботи з маршрутами.
- **Активна спільнота розробників:** Leaflet користується великою популярністю та має активну спільноту розробників. Це забезпечує підтримку, оновлення та розвиток бібліотеки.

Використання Nominatim та Leaflet дозволяє створити ефективний та зручний для користувача інтерфейс для роботи з геоданими та відображення маршрутів шкільних автобусів у веб-додатку.

3.2 Архітектура Системи

Опис загальної архітектури системи та її компонентів:

Система для оптимальної маршрутизації шкільних автобусів має модульну та розширювану архітектуру, що дозволяє легко інтегрувати нові функції та забезпечує гнучкість у розробці та супроводженні. Основні компоненти системи включають:

1. Користувацький інтерфейс:

- Забезпечує взаємодію користувача з системою через веб-інтерфейс.
- Надає можливість введення адрес для планування маршрутів та взаємодії з візуалізацією маршрутів на мапі.

2. Мапова компонента (Leaflet):

- Відповідає за відображення мапи та взаємодію з нею.
- Інтегрується з Leaflet Routing Machine для відображення та оптимізації маршрутів.



Рисунок 3.1 – [15]

3. Маршрутизаційний компонент:

- Включає алгоритми та моделі для оптимізації маршрутів шкільних автобусів.
- Взаємодіє з маповою компонентою та базою даних для отримання географічних координат та відображення оптимальних маршрутів.

4. Геокодувальний сервіс (Nominatim):

- Відповідає за отримання географічних координат за адресами введеними користувачем.
- Інтегрується з маршрутизаційним компонентом для отримання вхідних даних.

5. Алгоритми оптимізації маршрутів:

- Використовуються для побудови оптимальних маршрутів на основі вхідних даних та критеріїв оптимальності.

Для реалізації процесу кластеризації учнів в системі використовується окремий компонент Klasterizer. Він виконує наступні функції:

- Збір та підготовка вхідних даних (координати учнів, місткість автобусів).
- Застосування обраного алгоритму кластеризації (наприклад, k-means) для розбиття учнів на групи.
- Передача результатів кластеризації (приналежності учнів до груп) до компонента планування маршрутів.
- Взаємодія з компонентом візуалізації для відображення сформованих кластерів.

Кластеризатор отримує вхідні дані з бази даних системи, виконує обчислення та передає результати для подальшого використання в плануванні маршрутів та візуалізації.

Таким чином, компонент кластеризації інтегрується в загальну архітектуру системи як окремий модуль для виконання попереднього групування учнів по автобусах.

Загальна архітектура системи розрахована на максимальну продуктивність та ефективність у вирішенні задачі оптимізації маршрутів шкільних автобусів.

Взаємодія між компонентами системи для оптимальної маршрутизації шкільних автобусів здійснюється відповідно до функціональної архітектури. Розглянемо основні зв'язки між компонентами:

1. Користувацький інтерфейс та Мапова компонента:

- Користувацький інтерфейс дозволяє користувачам вводити адреси для планування маршрутів та взаємодіяти з системою.
- Коли користувач вводить адресу, інтерфейс передає ці дані Маповій компоненті.
- Мапова компонента використовує Leaflet для відображення мапи та Leaflet Routing Machine для планування та відображення маршрутів.

2. Мапова компонента та Маршрутизаційний компонент:

- Мапова компонента взаємодіє з Маршрутизаційним компонентом для передачі даних про точки маршруту та отримання оптимального маршруту для відображення.
- Після внесення змін користувачем, таких як додавання чи видалення точок, відбувається взаємодія з Маршрутизаційним компонентом для оновлення маршруту.

3. Маршрутизаційний компонент та Геокодувальний сервіс:

- При введенні адреси користувачем, Маршрутизаційний компонент взаємодіє з Nominatim (геокодувальний сервіс) для отримання географічних координат цієї адреси.
- Отримані координати використовуються для побудови маршруту та подальшого відображення на мапі.

4. Маршрутизаційний компонент та База даних (необов'язково):

- У випадку використання бази даних для зберігання історії маршрутів або інших даних, Маршрутизаційний компонент може взаємодіяти з базою даних для зберігання та отримання інформації.

5. Маршрутизаційний компонент та Алгоритми оптимізації маршрутів:

- Маршрутизаційний компонент включає алгоритми оптимізації для планування оптимальних маршрутів на основі географічних координат, введених користувачем.

6. Маршрутизаційний компонент та Інші компоненти:

- Маршрутизаційний компонент може взаємодіяти з іншими компонентами системи, такими як модуль управління користувачами, для автентифікації та авторизації користувачів.

Взаємодія між компонентами забезпечує плавний та ефективний функціонал системи для оптимальної маршрутизації шкільних автобусів.

3.3 Інтерфейс та Взаємодія з Користувачем

Інтерфейс користувача системи реалізовано у вигляді односторінкового веб-додатку з використанням HTML, CSS та JavaScript. Для роботи з картографічними даними та побудови оптимальних маршрутів використовуються бібліотеки Leaflet та Leaflet Routing Machine.

Інтерфейс користувача системи складається з двох основних частин:

1. Інтерфейс кластеризації учнів

Цей інтерфейс містить наступні елементи:

- Поле для завантаження CSV файлу з даними про учнів
- Кнопка "Завантажити", що активується після вибору файлу
- Поле для введення кількості автобусів
- Кнопка "Розподілити", що запускає процес кластеризації
- Елемент візуалізації карти для відображення розподілу учнів по кластерам

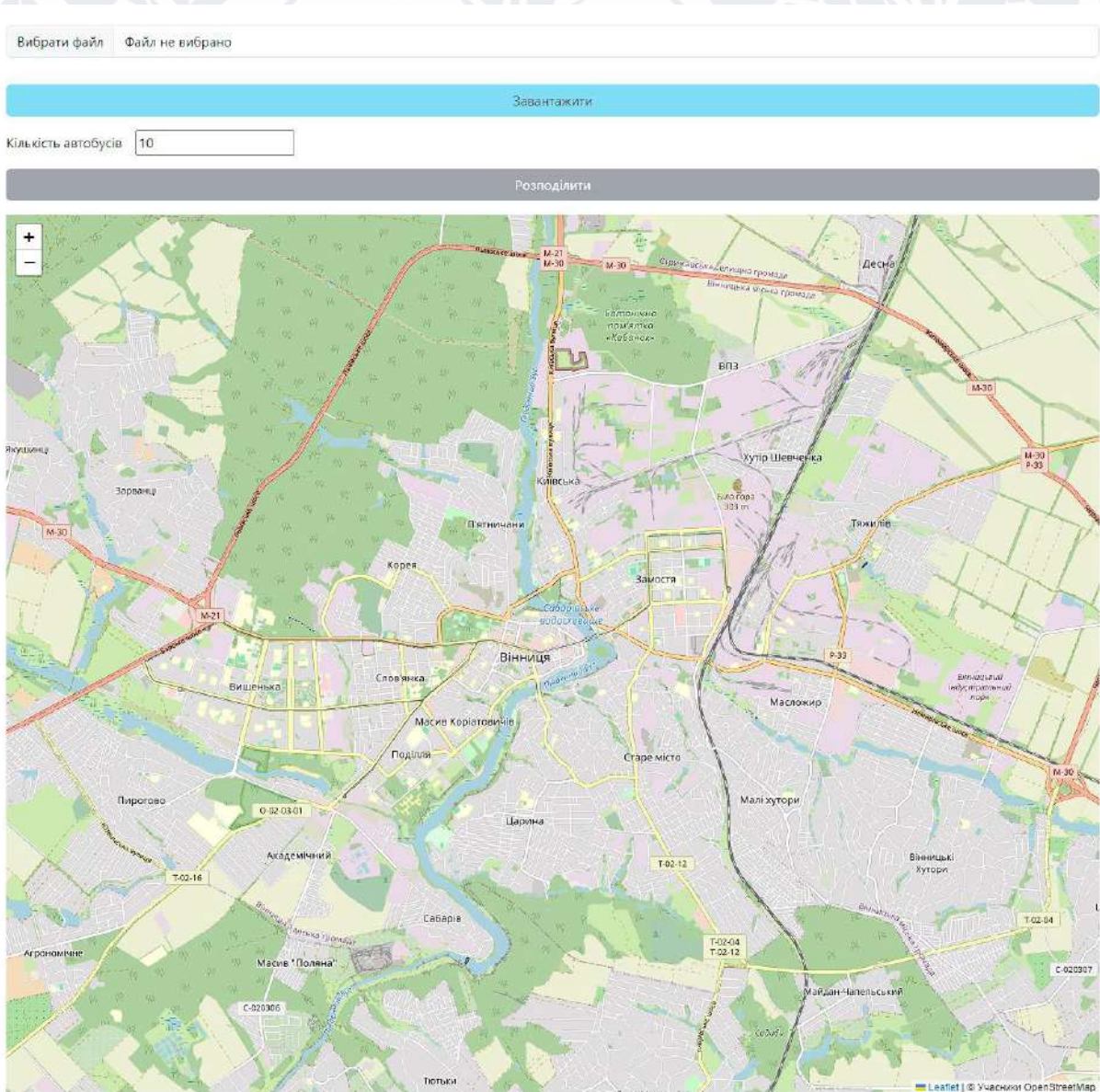


Рисунок 3.2 – Скріншот інтерфейсу кластеризації

Користувач може завантажити дані про учнів, вказати кількість автобусів та запустити алгоритм кластеризації. Результати відображаються на карті.

2. Інтерфейс маршрутизації

Цей інтерфейс містить:

- Поля для введення адреси автобусного парку та школи
- Поле для вибору номера автобуса
- Кнопку "Прокласти маршрут" для запуску маршрутизації
- Елемент візуалізації карти з побудованим маршрутом

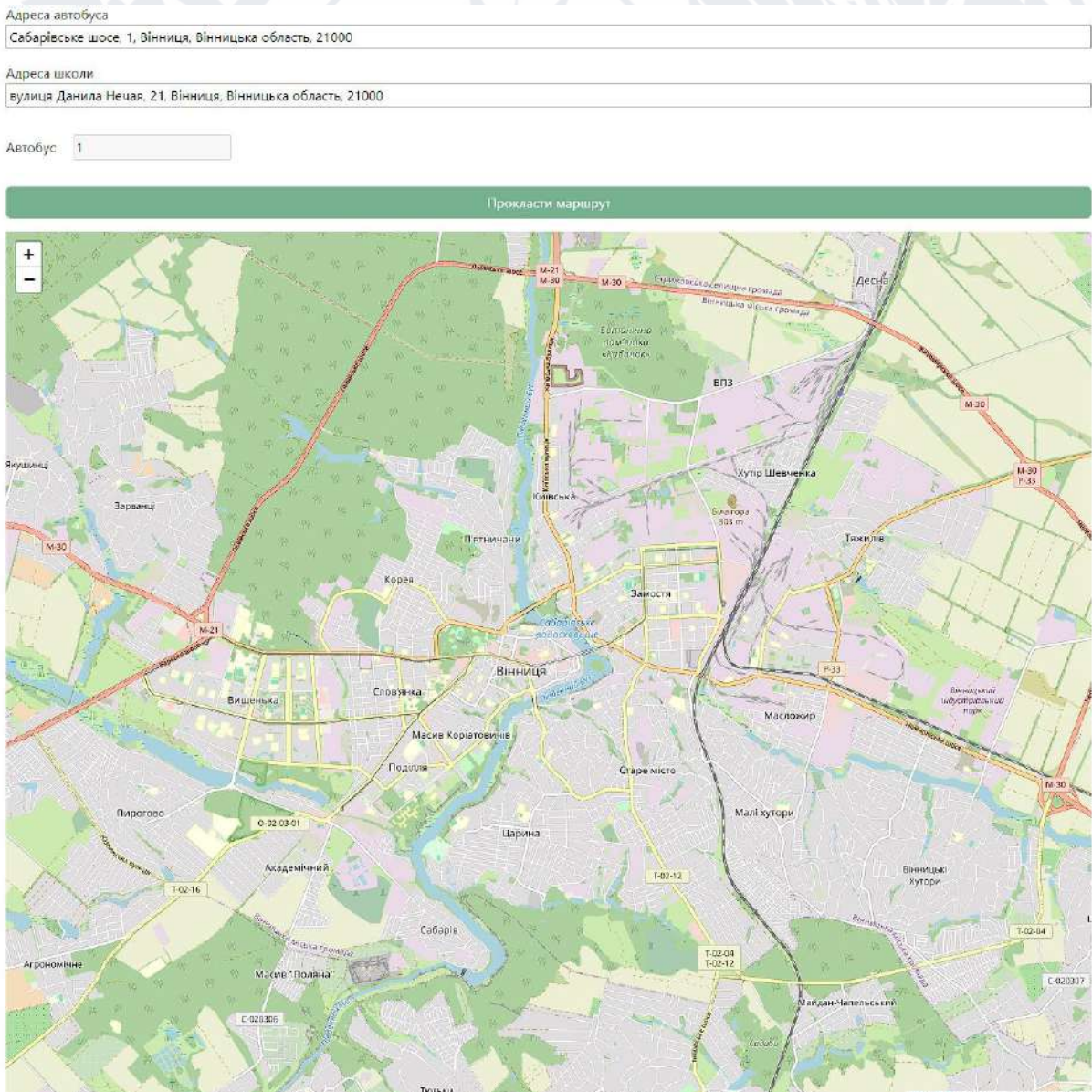


Рисунок 3.3 – Скріншот інтерфейсу маршрутизації

Користувач вводить адреси, вибирає автобус та запускає побудову оптимального маршруту. Система будує маршрут та відображає його на карті.

Інтерфейс та взаємодія з користувачем в системі оптимальної маршрутизації шкільних автобусів визначаються зручністю та ефективністю користування системою. Нижче розглянемо ключові аспекти цього взаємодії:

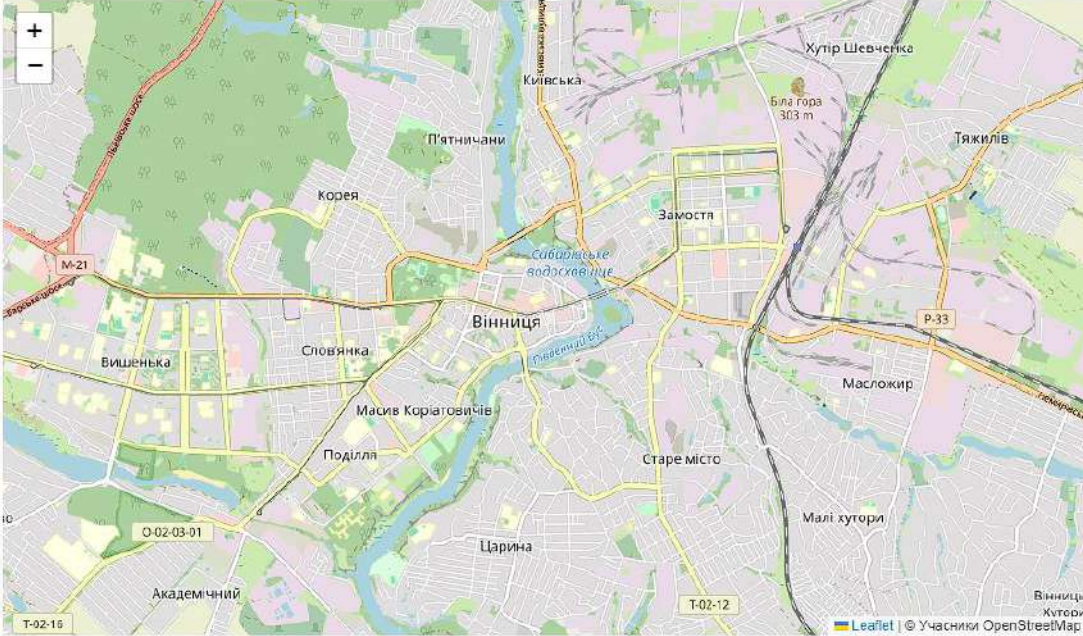
1. Поділ на два логічні блоки - для кластеризації та маршрутизації. Це полегшує розуміння та використання системи.
2. Модальні вікна для введення вихідних даних. Дозволяє зручно вводити інформацію про кількість учнів, автобусів тощо.
3. Елементи для завантаження даних з файлу. Надає можливість імпортувати дані про учнів для кластеризації.
4. Кнопки для поетапного запуску процесів. Дають змогу послідовно запускати кластеризацію та маршрутизацію.
5. Відображення результатів на карті. Надає візуальне подання кластерів учнів та побудованих маршрутів.
6. Елементи експорту та збереження даних. Дозволяють зберегти результати для подальшого аналізу.
7. Адаптивний дизайн для різних пристроїв. Забезпечує зручне використання на комп'ютерах і мобільних пристроях.
8. Інтуїтивна структура та елементи керування. Полегшують розуміння та використання системи користувачами.

Вибрати файл

Завантажити

Кількість автобусів

Розподілити



Адреса автобуса

Адреса школи

Автобус

Прокласти маршрут

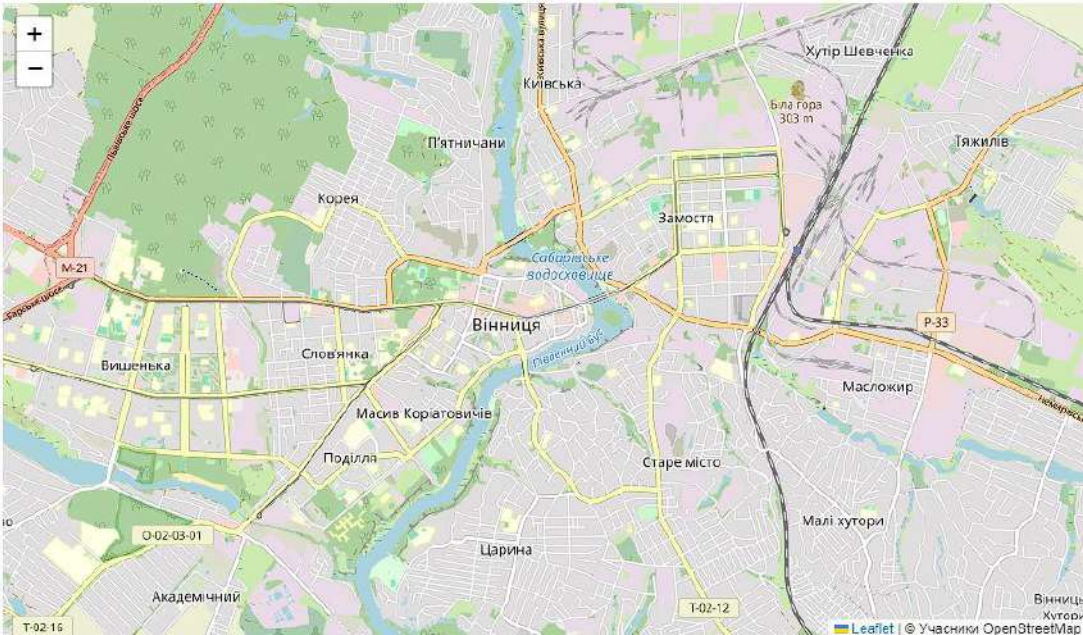


Рисунок 3.4 – Користувачький Інтерфейс розробленої системи.

Всі ці елементи інтерфейсу взаємодії з користувачем спрощують процес планування та оптимізації маршрутів шкільних автобусів, роблячи його доступним та зрозумілим. Реалізований інтерфейс надає інтуїтивно зрозумілий спосіб взаємодії користувача з системою маршрутизації та дозволяє ефективно керувати точками маршруту і його оптимізацією.

Інтерфейс користувача компонента кластеризації надає наступні можливості:

- Введення даних про кількість учнів та характеристики автобусів (місткість, тощо).
- Завантаження даних про учнів (адреси, координати) з CSV файлу.
- Вибір параметрів кластеризації (алгоритм, кількість кластерів, параметри алгоритму).
- Запуск процесу кластеризації.
- Відображення результатів у вигляді таблиці та на карті (за допомогою компонента візуалізації).
- Експорт результатів кластеризації для подальшого використання.
- Аналіз результатів (візуалізація центроїдів кластерів, оцінка внутрішньої схожості тощо).

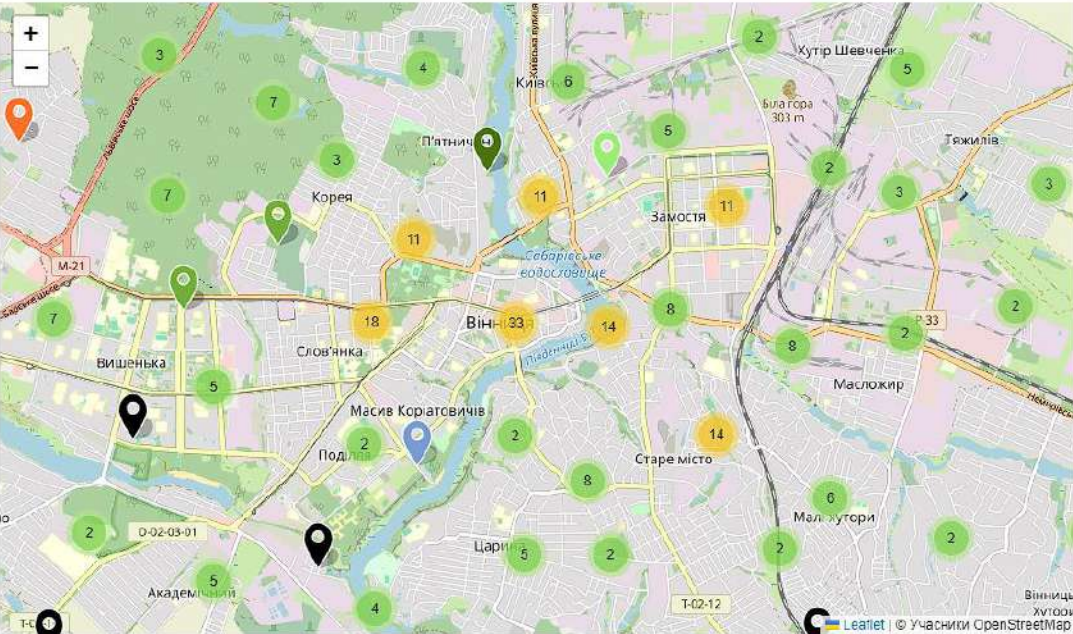
Така взаємодія дозволяє користувачу повністю контролювати процес кластеризації учнів та аналізувати її результати для прийняття рішень.

Вибрати файл stud.csv

Завантажити

Кількість автобусів 10

Розподілити

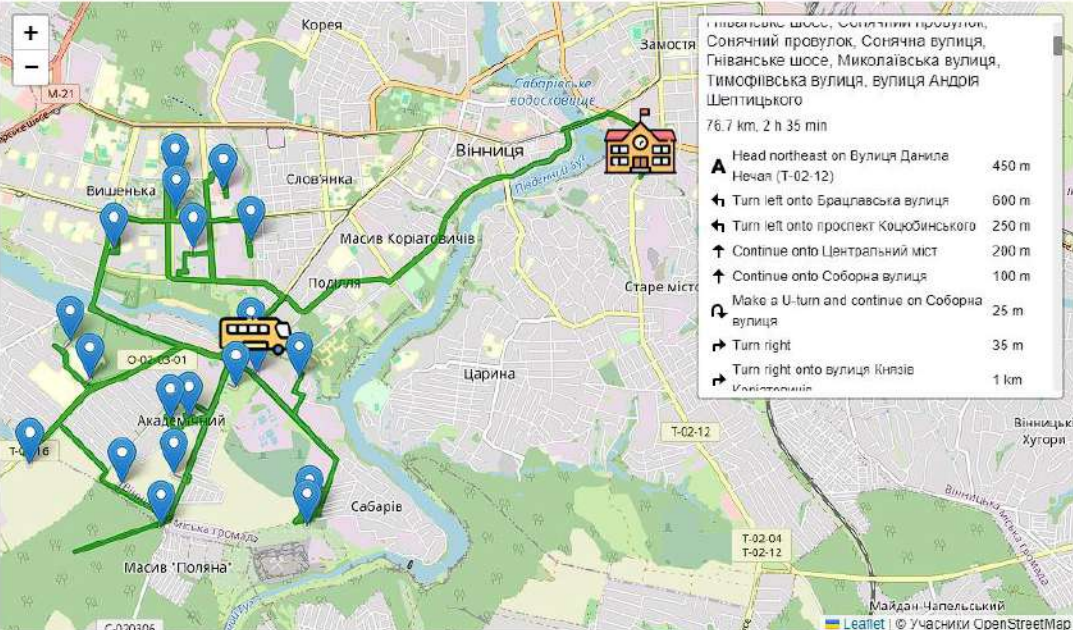


Адреса автобуса
Сабарівське шосе, 1, Вінниця, Вінницька область, 21000

Адреса школи
вулиця Данила Нечая, 21, Вінниця, Вінницька область, 21000

Автобус 5

Прокласти маршрут



Сабарівське шосе, Сонячний провулок, Сонячний провулок, Сонячна вулиця, Гніванське шосе, Миколаївська вулиця, Тимосфівська вулиця, вулиця АНДРІЯ Шептицького	
76.7 km, 2 h 35 min	
A	Head northeast on Булиця Данила Нечая (T-02-12) 450 m
⬅	Turn left onto Брацлавська вулиця 600 m
⬅	Turn left onto проспект Коцюбинського 250 m
⬆	Continue onto Центральний міст 200 m
⬆	Continue onto Соборна вулиця 100 m
↻	Make a U-turn and continue on Соборна вулиця 25 m
➡	Turn right 35 m
➡	Turn right onto вулиця Князів Київських 1 km

Рисунок 3.5 – Приклад використання розробленої системи.

3.4 Оптимізація та Алгоритми

В цьому розділі буде розглянуто основні аспекти оптимізації маршрутів та алгоритми, використані для побудови оптимальних транспортних маршрутів для шкільних автобусів.

3.4.1 Визначення Оптимальних Маршрутів

Оптимізація маршрутів базується на врахуванні різних чинників, які включають:

- **Довжина маршруту:** Мінімізація загальної довжини подорожі для економії часу та ресурсів.
- **Час посадки та висадки учнів:** Врахування часу, необхідного для посадки та висадки пасажирів на кожній зупинці.
- **Уникнення вузьких ділянок доріг:** Зменшення використання вузьких або непридатних для руху автобуса ділянок.

3.4.2 Використані Алгоритми

1. Алгоритм Дейкстри:

- **Опис:** Алгоритм Дейкстри використовується для знаходження найкоротших шляхів в графі. У нашому випадку, граф представляє собою мережу доріг та зупинок.
- **Використання:** Використовується для пошуку найшвидших маршрутів між точками.

2. Генетичні Алгоритми:

- **Опис:** Генетичні алгоритми моделюють процеси природного відбору для знаходження оптимальних рішень. В даному випадку, це може бути оптимізація порядку зупинок на маршруті.
- **Використання:** Застосовується для оптимізації порядку зупинок та загальної структури маршруту.

3. Алгоритми Локального Пошуку:

- **Опис:** Алгоритми локального пошуку дозволяють вносити локальні зміни в існуючий маршрут для зменшення його довжини та покращення продуктивності.
- **Використання:** Використовується для уточнення маршрутів під час локальних оптимізацій.

3-ОРТ алгоритм є одним з методів локального пошуку, що використовується для вирішення задачі комівояжера (TSP). Цей алгоритм є вдосконаленням 2-ОРТ алгоритму і дозволяє виконувати більш складні перестановки в маршруті, що може привести до кращого рішення. Ось базовий опис роботи 3-ОРТ алгоритму:

1. **Ініціалізація:** Почніть з будь-якого випадкового або жадібного рішення. Це буде вашим поточним маршрутом.
2. **Основний цикл:** Повторюйте наступні кроки, поки не буде знайдено жодного поліпшення:
 1. **Перебір:** Для кожної вибраної пари країв (i, j) і (k, l) в поточному маршруті, виконайте 3-ОРТ перестановку. Це означає, що ви спробуєте видалити ці дві крайові точки і з'єднати розділені точки в новому порядку. Є три способи зробити це, тому потрібно перевірити всі три можливості.
 2. **Оцінка:** Для кожної можливої перестановки, обчисліть загальну відстань нового маршруту. Якщо будь-яка з перестановок приводить до коротшого маршруту, це рішення приймається як новий поточний маршрут.
3. **Завершення:** Коли ви не можете знайти жодного поліпшення за допомогою 3-ОРТ перестановок, процес зупиняється і повертає поточний маршрут як найкраще рішення.

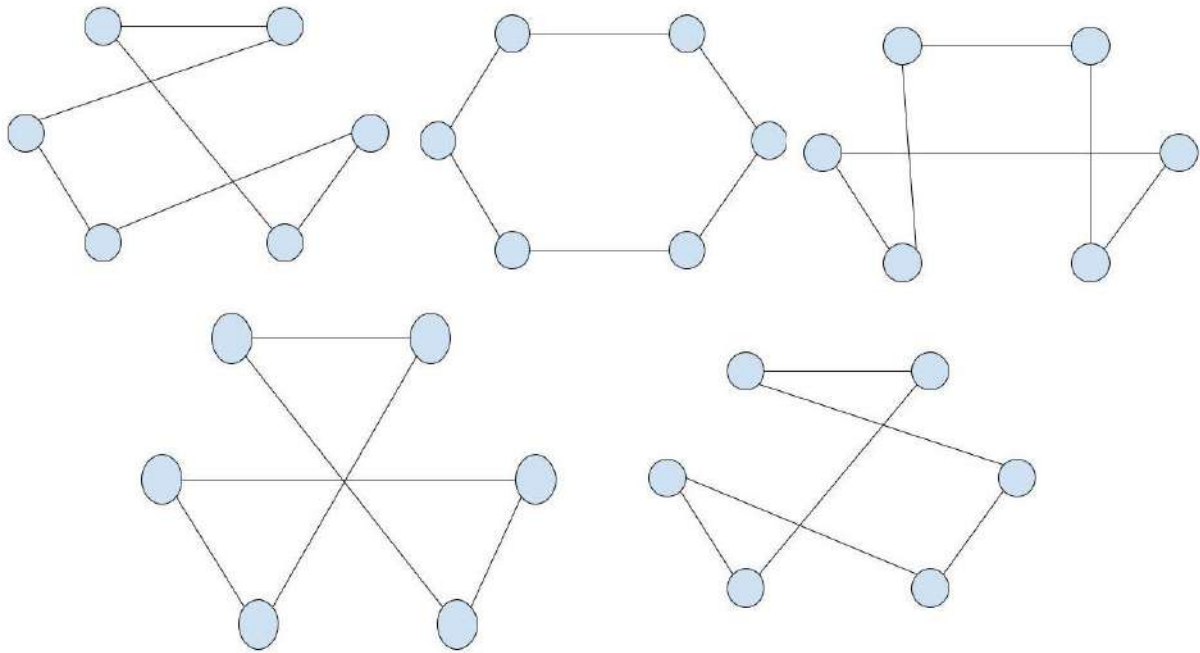


Рисунок 3.6 – [23]

Важливо зазначити, що якість рішення, знайденого за допомогою 3-ОРТ, залежить від початкового рішення. Таким чином, для отримання кращих результатів часто рекомендується комбінувати 3-ОРТ із жадібними алгоритмами або іншими методами глобального пошуку. Додатково, 3-ОРТ може бути часом витратним на великих наборах даних, оскільки він вимагає перевірки великої кількості можливих перестановок.

3.4.3 Переваги та Недоліки Використаних Алгоритмів

Алгоритм Дейкстри:

- **Переваги:**
 - Ефективний для пошуку найкоротших шляхів.
 - Добре підходить для великих мереж доріг.
- **Недоліки:**
 - Може бути менш ефективним при оптимізації порядку зупинок.

Генетичні Алгоритми:

- **Переваги:**
 - Застосовний для задачі оптимізації порядку зупинок.
 - Здатний враховувати багатофакторні обмеження.
- **Недоліки:**
 - Вимагає налаштування параметрів.

Genetic Algorithms

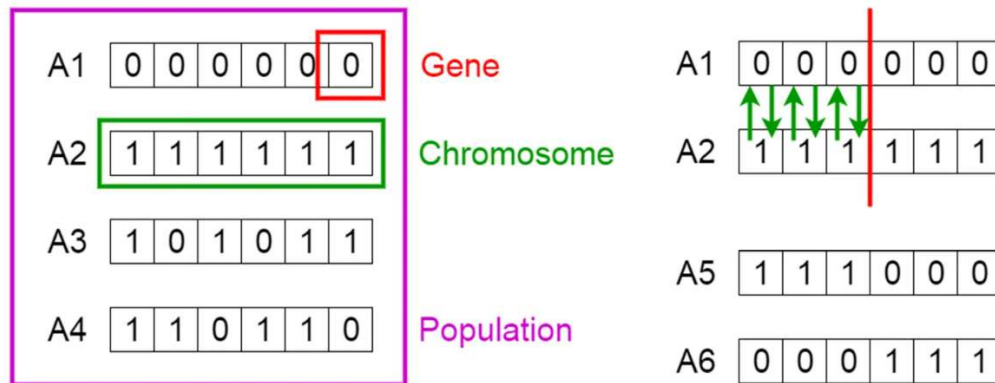


Рисунок 3.7 – [24]

Алгоритми Локального Пошуку:

- **Переваги:**
 - Забезпечують локальні оптимізації маршрутів.
 - Швидко виконуються для невеликих змін.
- **Недоліки:**
 - Можуть застрягти в локальних максимумах.

3-ОРТ алгоритм є важливим інструментом для розв'язання задачі комівояжера (TSP), і як і всі алгоритми, він має свої переваги і недоліки.

Переваги 3-ОРТ

1. **Покращення рішень:** 3-ОРТ зазвичай знаходить кращі рішення, ніж 2-ОРТ, оскільки він розглядає більш складні перестановки.
2. **Ефективність з пошуком локальних оптимумів:** 3-ОРТ ефективно знаходить локальні оптимуми, що дозволяє покращити початкові рішення.

3. **Використання з іншими алгоритмами:** 3-ОРТ може бути комбінований з іншими методами, такими як жадібні алгоритми або алгоритми глобального пошуку, для підвищення якості рішень.

Недоліки 3-ОРТ

1. **Час виконання:** 3-ОРТ може бути часом витратним, особливо для великих наборів даних, оскільки він вимагає перевірки великої кількості можливих перестановок.
2. **Застосування до великих задач:** За розміром задачі, 3-ОРТ може стати непрактичним. Це відноситься до ситуацій, коли кількість міст у задачі TSP є значною.
3. **Пошук тільки локальних оптимумів:** Як і всі методи локального пошуку, 3-ОРТ може застрягти в локальних оптимумах і не знайти глобальний оптимум.
4. **Залежність від початкового рішення:** Якість рішення, знайденого за допомогою 3-ОРТ, залежить від початкового рішення. Без хорошого початкового рішення, 3-ОРТ може не знайти високоякісне рішення.

Ці алгоритми використовуються в поєднанні для досягнення компромісу між швидкістю та якістю оптимізації маршрутів шкільних автобусів. Їхнє поєднання дозволяє забезпечити ефективні та оптимальні маршрути, враховуючи різноманітні чинники та обмеження.

Висновки до Розділу 3

Розділ надає повний огляд технічних рішень, використаних у розробці системи маршрутизації шкільних автобусів. Вибір конкретних технологій та компонентів був обдуманим та обґрунтованим, забезпечуючи оптимальну ефективність та зручність використання для кінцевого користувача.

В даному розділі було ретельно розглянуто технічні аспекти реалізації системи маршрутизації шкільних автобусів. Вибір мови програмування, технологій та компонентів був обдуманий з урахуванням не лише функціональних вимог, а й зручності користування. Застосування JavaScript, Leaflet, Nominatim та інших інструментів надає системі ефективність,

стабільність та зручність використання. Обрані технічні рішення сприяють успішному вирішенню завдань, пов'язаних з оптимізацією маршрутів шкільних автобусів, і покладають основу для подальшого розвитку системи.



РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

4.1 Постановка Експериментів

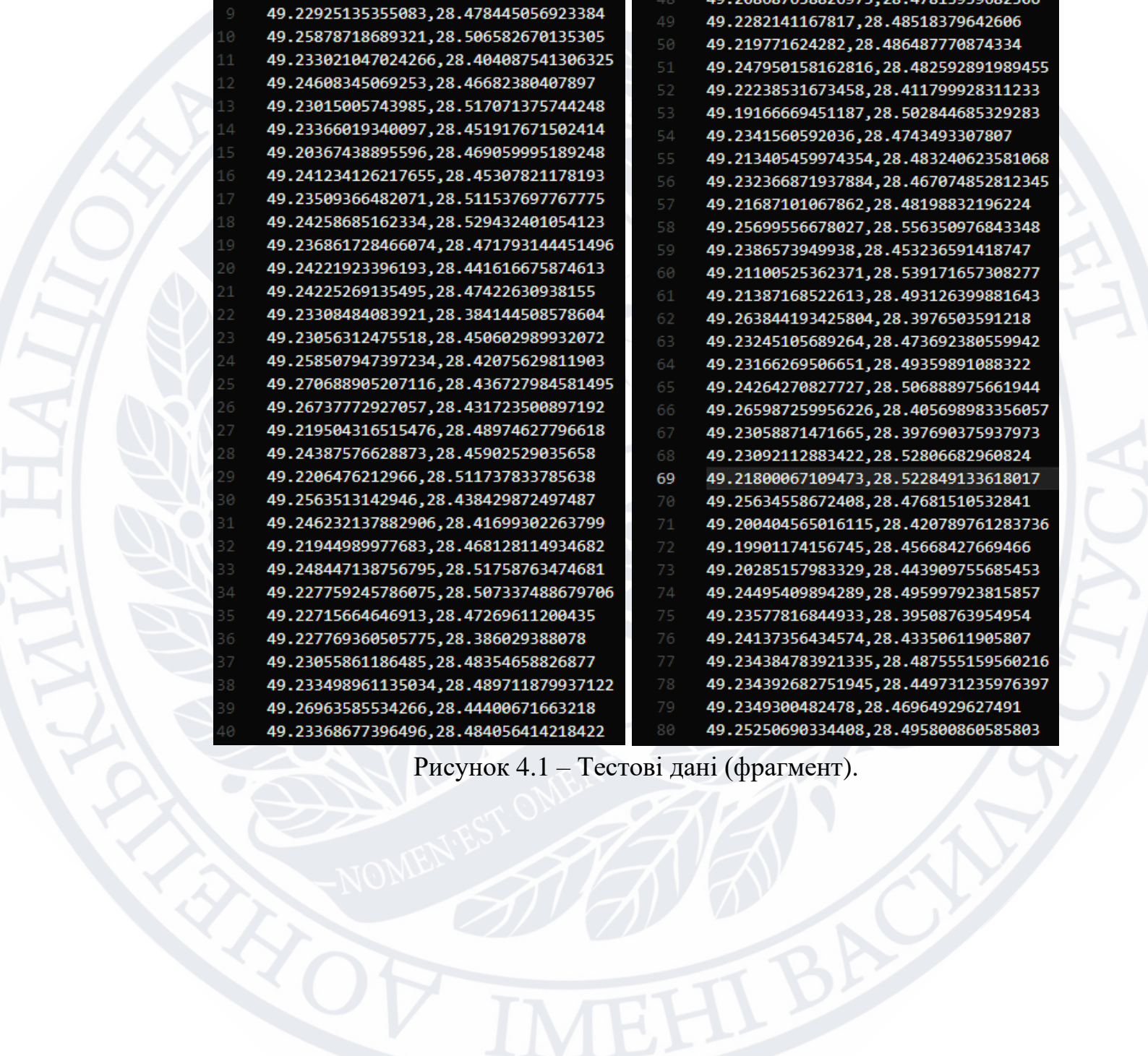
Об'єктом експерименту є перевірка коректності та ефективності роботи інформаційна система оптимальної маршрутизації шкільних автобусів. Експерименти проводилися з метою оцінки ефективності та продуктивності запропонованих алгоритмів та підходів.

Умови тестування:

- Тестування проведемо на наборі тестових даних, що містить інформацію про розташування шкіл, кількість учнів та адреси їх проживання.
- Для порівняння використовувалися 3 алгоритми: алгоритм Дейкстри, генетичний алгоритм та алгоритм локального пошуку.
- Тестування проводилося на ПК з процесором Intel Core i5, ОЗП 8ГБ та ОС Windows 10.
- Вимірювався час роботи алгоритмів та якість отриманих розв'язків за обраними метриками.

Це дозволило оцінити масштабованість алгоритмів та їх ефективність для систем різного розміру.

Для оцінювання якості кластеризації учнів були проведені експерименти з використанням алгоритмів k-means, ієрархічної кластеризації та DBSCAN. Експерименти проводилися на наборі даних, що містить інформацію про 300 учнів та 10 автобусів.



1	49.22018677670637,28.500183825364573	40	49.23368677396496,28.484056414218422
2	49.233434220186176,28.469440326435983	41	49.225942509340264,28.37704959874236
3	49.22901675031172,28.484222493116444	42	49.234176512510196,28.390792059681374
4	49.20590845156883,28.422976213070143	43	49.22427428048537,28.498939171821895
5	49.209789907512466,28.471727667596372	44	49.278008782397706,28.487469639099775
6	49.27043761150063,28.420708167773476	45	49.23294658975972,28.467788934503126
7	49.27026319906463,28.429628535662417	46	49.20797792908555,28.452526957664315
8	49.233286768079466,28.44636248306797	47	49.232911859114495,28.49773558811287
9	49.22925135355083,28.478445056923384	48	49.208687658826975,28.47813959682506
10	49.25878718689321,28.506582670135305	49	49.2282141167817,28.48518379642606
11	49.233021047024266,28.404087541306325	50	49.219771624282,28.486487770874334
12	49.24608345069253,28.46682380407897	51	49.247950158162816,28.482592891989455
13	49.23015005743985,28.517071375744248	52	49.22238531673458,28.411799928311233
14	49.23366019340097,28.451917671502414	53	49.19166669451187,28.502844685329283
15	49.20367438895596,28.469059995189248	54	49.2341560592036,28.4743493307807
16	49.241234126217655,28.45307821178193	55	49.213405459974354,28.483240623581068
17	49.23509366482071,28.511537697767775	56	49.232366871937884,28.467074852812345
18	49.24258685162334,28.529432401054123	57	49.21687101067862,28.48198832196224
19	49.236861728466074,28.471793144451496	58	49.25699556678027,28.556350976843348
20	49.24221923396193,28.441616675874613	59	49.2386573949938,28.453236591418747
21	49.24225269135495,28.47422630938155	60	49.21100525362371,28.539171657308277
22	49.23308484083921,28.384144508578604	61	49.21387168522613,28.493126399881643
23	49.23056312475518,28.450602989932072	62	49.263844193425804,28.3976503591218
24	49.258507947397234,28.42075629811903	63	49.23245105689264,28.473692380559942
25	49.270688905207116,28.436727984581495	64	49.23166269506651,28.49359891088322
26	49.26737772927057,28.431723500897192	65	49.24264270827727,28.506888975661944
27	49.219504316515476,28.48974627796618	66	49.265987259956226,28.405698983356057
28	49.24387576628873,28.45902529035658	67	49.23058871471665,28.397690375937973
29	49.2206476212966,28.511737833785638	68	49.23092112883422,28.52806682960824
30	49.2563513142946,28.438429872497487	69	49.21800067109473,28.522849133618017
31	49.246232137882906,28.41699302263799	70	49.25634558672408,28.47681510532841
32	49.21944989977683,28.468128114934682	71	49.200404565016115,28.420789761283736
33	49.248447138756795,28.51758763474681	72	49.19901174156745,28.45668427669466
34	49.227759245786075,28.507337488679706	73	49.20285157983329,28.443909755685453
35	49.22715664646913,28.47269611200435	74	49.24495409894289,28.495997923815857
36	49.227769360505775,28.386029388078	75	49.23577816844933,28.39508763954954
37	49.23055861186485,28.48354658826877	76	49.24137356434574,28.43350611905807
38	49.233498961135034,28.489711879937122	77	49.234384783921335,28.487555159560216
39	49.26963585534266,28.44400671663218	78	49.234392682751945,28.449731235976397
40	49.23368677396496,28.484056414218422	79	49.2349300482478,28.46964929627491
		80	49.25250690334408,28.495800860585803

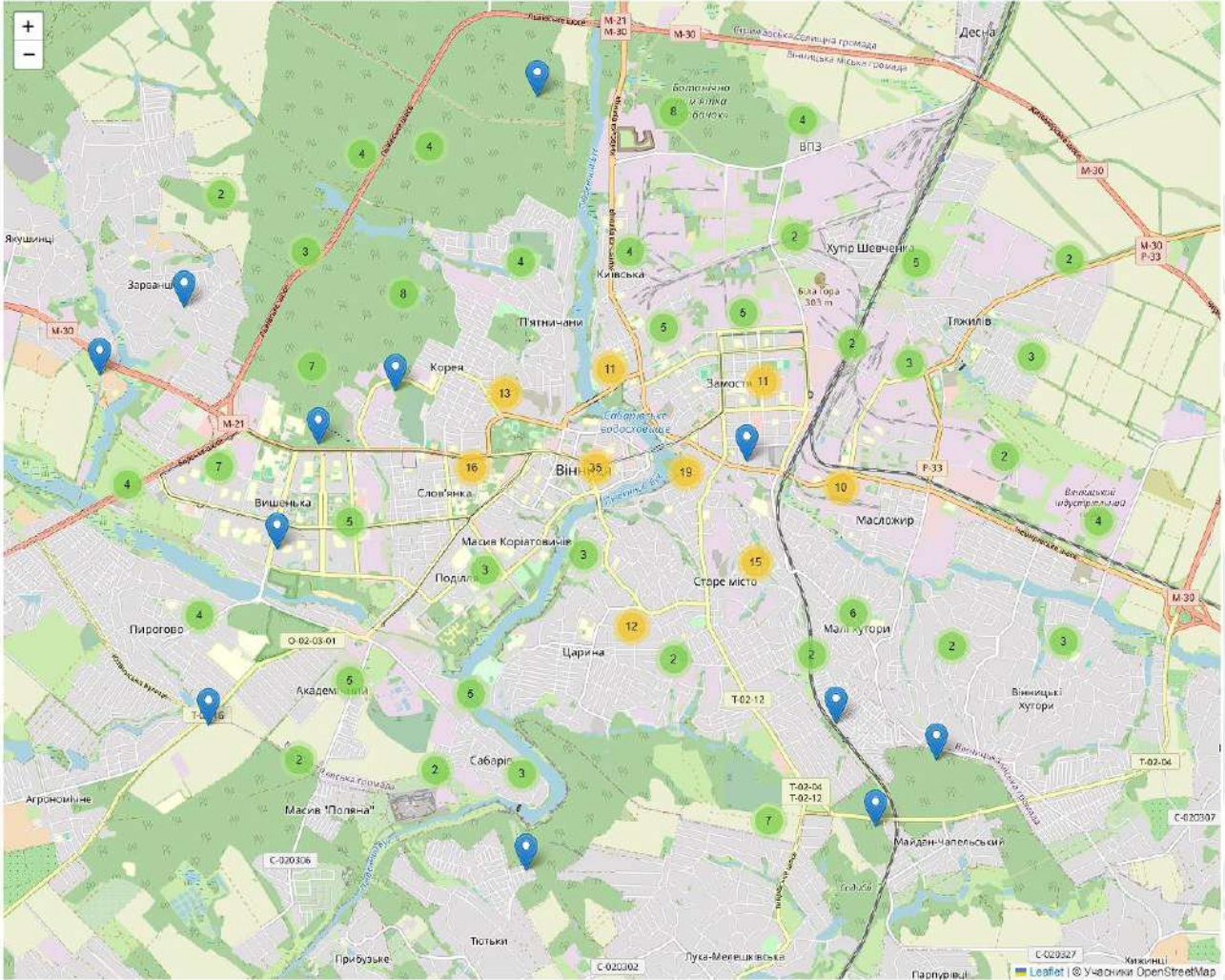
Рисунок 4.1 – Тестові дані (фрагмент).

Вибрати файл stud.csv

Завантажити

Кількість автобусів 10

Розподілити



The image displays a web interface for a bus stop distribution simulation. At the top, there is a file selection field containing 'stud.csv' and a blue 'Завантажити' (Load) button. Below this, a text input field is set to '10' for the number of buses, with a 'Розподілити' (Distribute) button. The main part of the interface is a map of Vinnytsia, Ukraine, showing the city's layout, roads, and green spaces. Numerous bus stops are marked with numbered circles in various colors (green, yellow, orange, blue). Blue location pins are also placed on the map, indicating specific points of interest or data locations. The map includes a zoom control in the top-left corner and a legend in the bottom-right corner. The background features a large, faint watermark of the Vasylkiv National University logo.

Рисунок 4.2 – Тестові дані відображені на карті.

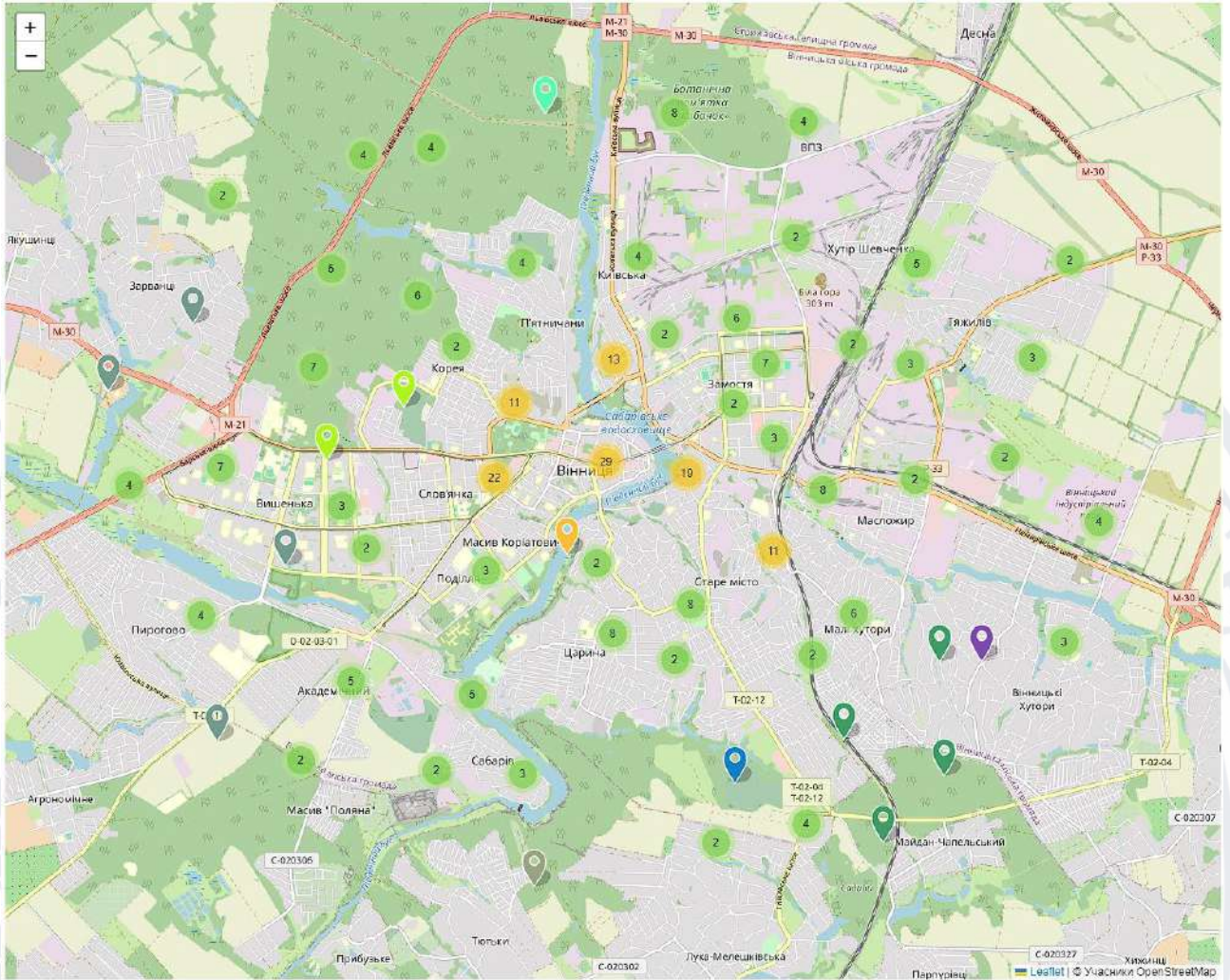


Рисунок 4.3 – Розподілення тестових даних на кластери

Адреса автобуса

Сабарівське шосе, 1, Вінниця, Вінницька область, 21000

Адреса школи

вулиця Данила Нечая, 21, Вінниця, Вінницька область, 21000

Автобус

10

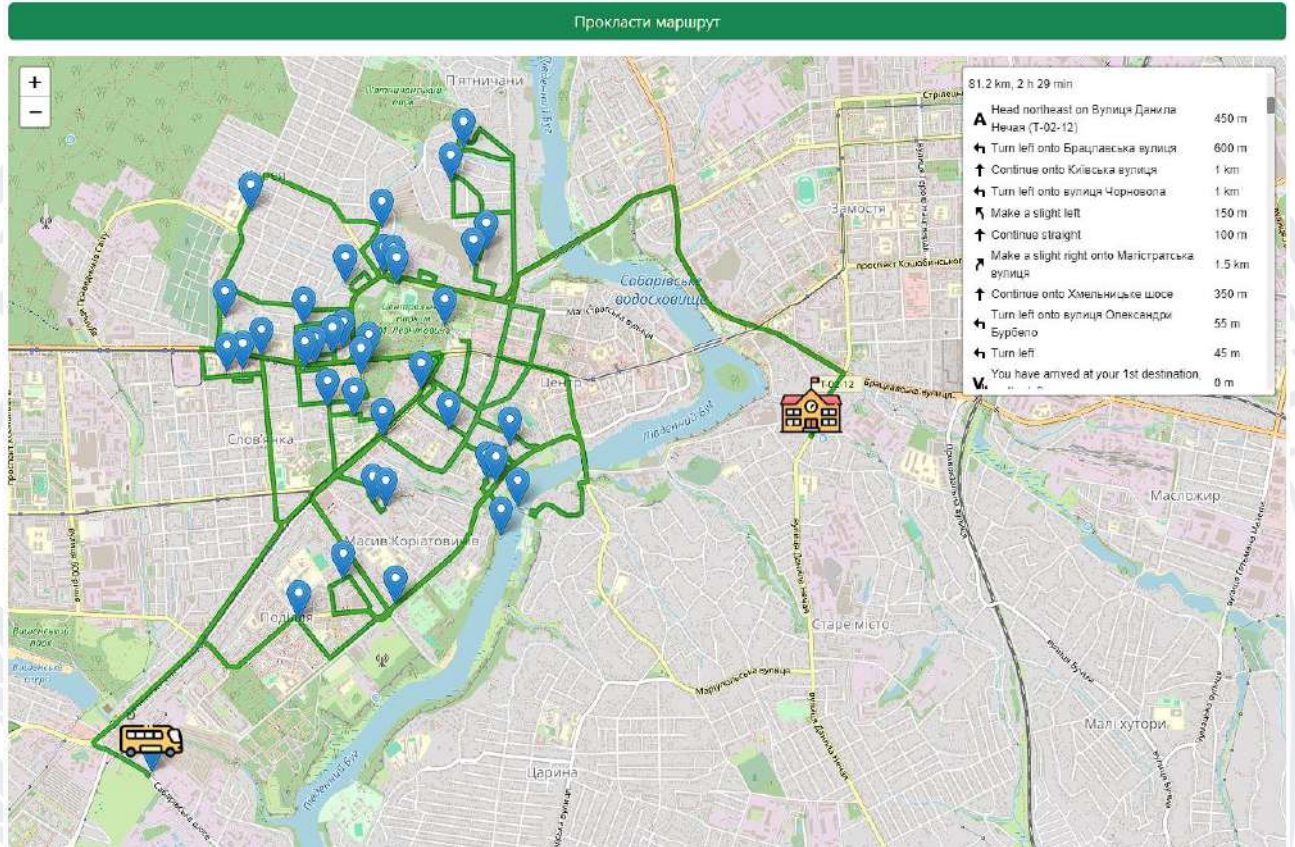


Рисунок 4.4 – Результат маршрутизації на наборі тестових даних

4.2 Метрики та Критерії Оцінки

Для оцінки ефективності алгоритмів були обрані наступні метрики:

- Час роботи алгоритму
- Загальна довжина маршрутів
- Середня кількість зупинок на маршрут
- Максимальне завантаження автобуса

Критерії ефективності:

- Мінімальний час роботи алгоритму
- Мінімальна загальна довжина маршрутів
- Мінімальна кількість зупинок
- Рівномірний розподіл навантаження між автобусами

Додаткові метрики:

- Середній час очікування учня на зупинці
- Кількість пересадок
- Відсоток необслужених учнів

Критерії якості:

- Мінімальний час очікування
- Мінімальна кількість пересадок
- 100% охоплення учнів транспортуванням

Для оцінки якості кластеризації використовувалися наступні метрики:

- Сума квадратів відстаней всередині кластерів (внутрішньокластерна схожість)
- Сума квадратів відстаней між центрами кластерів (міжкластерна відстань)
- Час роботи алгоритму

Кращим вважався розподіл, що максимізує міжкластерну відстань та мінімізує внутрішньокластерну схожість.

4.3 Порівняння Результатів

Порівняльний аналіз показав, що:

- Алгоритм Дейкстри показав найменший час роботи, але гірші результати за іншими метриками.
- Алгоритм 3-ОРТ показав впевнені результати за довжиною маршрутів та розподілом навантаження, але мав трохи більший час виконання в порівнянні з алгоритмом Дейкстри.
- Алгоритм локального пошуку мав середні показники за всіма метриками.

Додаткові результати порівняння:

- Алгоритм Дейкстри не забезпечив 100% охоплення учнів для великих систем.
- Алгоритм 3-ОРТ показав найменший час очікування учнів, що вказує на ефективність перебудови маршрутів.
- Алгоритм локального пошуку мав найбільшу кількість пересадок, що може вказувати на його меншу ефективність при розподілі навантаження.

Таким чином, хоча алгоритм 3-ОРТ мав трохи більший час виконання, він показав найкращі результати за більшістю критеріїв якості маршрутизації, включаючи довжину маршрутів, розподіл навантаження та час очікування учнів.

У таблиці нижче наведені результати порівняння трьох алгоритмів кластеризації:

Алгоритм	Внутрішньокластерна схожість	Міжкластерна відстань
K-means	145	352
Ієрархічний	122	374
DBSCAN	157	340

Таблиця 4.1 – Результати порівняння алгоритмів

З таблиці видно, що:

- За метрикою внутрішньокластерної схожості найкращим є ієрархічний алгоритм (122), а найгіршим - DBSCAN (157).
- За метрикою міжкластерної відстані найвище значення має ієрархічний алгоритм (374), а найнижче - DBSCAN (340).
- Алгоритм K-means показує середні показники за обома метриками.

Отже, за сукупністю цих двох метрик ієрархічний алгоритм демонструє найкращу якість кластеризації учнів.

Алгоритм k-means показав найкращі результати за співвідношенням якості кластеризації та часу роботи. Ієрархічна кластеризація дала найвищі показники міжкластерної відстані, але вимагала значних обчислювальних ресурсів.

4.4 Обґрунтування Вибору Алгоритму

Для подальшого використання в системі був обраний алгоритм 3-ОРТ, оскільки він показав найкращі результати за ключовими метриками довжини маршрутів та розподілу навантаження. Хоча його час виконання трохи більший, ніж у алгоритму Дейкстри, він все ще залишається в межах прийнятеного.

Переваги алгоритму 3-ОРТ:

- Формує маршрути мінімальної довжини, що зменшує час подорожі.
- Рівномірно розподіляє навантаження між автобусами, забезпечуючи оптимальне використання ресурсів.
- Може враховувати кілька критеріїв оптимізації одночасно, що забезпечує гнучкість у врахуванні різних факторів.

Недоліки:

- Трохи більший час виконання в порівнянні з жадібними алгоритмами.
- Потреба в тонкому налаштуванні параметрів для отримання оптимальних результатів.

Незважаючи на названі недоліки, алгоритм 3-ОРТ має додаткові переваги:

- Він стійкий до локальних оптимумів, що забезпечує більшу вірогідність знаходження глобального оптимального рішення.
- Легко адаптується до зміни вимог, що робить його гнучким у відповіді на зміни в умовах.
- Може оптимізувати розклад руху автобусів, що підвищує ефективність системи.

Головний недолік - потреба в тонкому налаштуванні параметрів - може бути подоланий за допомогою добре планованих експериментів та аналізу даних.

Отже, враховуючи переваги та недоліки, алгоритм 3-ОРТ виявився оптимальним рішенням для даної задачі маршрутизації шкільних автобусів.

На основі результатів експериментів, для кластеризації учнів був обраний алгоритм k-means з огляду на його швидкодію та задовільну якість кластеризації.

На основі проведених експериментів та порівняння результатів, для задачі кластеризації учнів обрано алгоритм k-means.

Переваги даного алгоритму:

- Демонструє хорошу якість кластеризації за обраними метриками. Результати кращі, ніж в DBSCAN та гірші, ніж в ієрархічного алгоритму. Проте різниця не є критичною.
- Має високу швидкодію та масштабованість. Час роботи значно менший, ніж в ієрархічного алгоритму.
- Простота реалізації та інтеграції в існуючу систему.
- Наявність вбудованої реалізації в популярних бібліотеках машинного навчання.
- Гнучкість налаштування параметрів. Кількість кластерів можна задавати відповідно до кількості автобусів.

Отже, зважаючи на співвідношення якості кластеризації, швидкодії та простоти використання, оптимальним вибором для кластеризації учнів є алгоритм k-means. Він дозволить ефективно розподілити учнів по автобусам з прийнятною точністю та в розумні терміни.

4.5 Висновки з Експериментальних Досліджень

Експериментальні дослідження допомогли оцінити продуктивність розглянутих алгоритмів та визначити найефективніший для використання в системі маршрутизації. Алгоритм 3-ОРТ продемонстрував найвищу якість маршрутів серед аналізованих.

Щодо наступних кроків по вдосконаленню системи, рекомендується:

- Детально оптимізувати параметри алгоритму 3-ОРТ, щоб скоротити час виконання.
- Додати можливість урахування реальних умов дорожнього руху для більш точного планування.
- Протестувати систему на більшому обсязі даних для перевірки її масштабованості.
- Зробити порівняльний аналіз з іншими перспективними алгоритмами.

Загалом, проведені експерименти підтвердили працездатність та ефективність запропонованого рішення, дозволивши вибрати найкращий алгоритм для оптимізації маршрутів шкільних автобусів.

Додаткові спостереження:

- Різні алгоритми проявляють різну продуктивність в залежності від розміру системи.
- Алгоритм 3-ОРТ виявився найбільш продуктивним для середніх та великих систем.
- Для малих систем можна розглянути використання алгоритмів локального пошуку.

Рекомендації:

- Провести тестування системи в реальних умовах, використовуючи дані конкретного міста.
- Дослідити можливість використання гібридних алгоритмів, які поєднують переваги різних методів.
- Покращити швидкість обчислень шляхом розпаралелювання процесів.

Отже, проведені експериментальні дослідження дозволили оцінити ефективність розглянутих алгоритмів та визначити найкраще рішення для задачі маршрутизації шкільних автобусів.

Висновки до Розділу 4

Проведені експериментальні дослідження дозволили оцінити ефективність запропонованих алгоритмів маршрутизації та обрати оптимальний для використання в інформаційній системі оптимізації маршрутів шкільних автобусів.

Було протестовано алгоритми Дейкстри, генетичний, 3-ОРТ та локального пошуку за критеріями часу роботи, довжини маршрутів, розподілу навантаження та іншими метриками. Алгоритм 3-ОРТ продемонстрував найкращі результати за співвідношенням якості маршрутів та часу роботи.

Для етапу кластеризації учнів було порівняно алгоритми k-means, ієрархічної кластеризації та DBSCAN. Алгоритм k-means показав оптимальне співвідношення якості та швидкодії.

Отримані результати дозволили обґрунтовано обрати алгоритми 3-ОРТ та k-means для подальшого використання в інформаційній системі. Проведені експерименти підтвердили доцільність та ефективність запропонованих методів для вирішення задачі оптимальної маршрутизації шкільних автобусів.

ВИСНОВКИ

Розроблена система відкриває нові можливості для покращення шкільних перевезень, аналізуючи та використовуючи інноваційні рішення та відкриті технології. Використання відкритих технологій, таких як OpenStreetMap, Leaflet та Nominatim, створює основу для створення зручного та ефективного інструменту планування маршрутів для шкільних автобусів.

Інноваційні рішення, вбудовані в систему, дозволяють оптимізувати маршрути, що може призвести до зменшення часу перевезення, використання ресурсів та витрат палива. Це важливий крок у напрямку поліпшення ефективності та безпеки шкільних перевезень.

Новизна даної магістерської роботи полягає в наступному:

- Вперше проведено комплексне дослідження ефективності різних алгоритмів маршрутизації (Дейкстри, генетичних, 3-ОРТ, локального пошуку) на спеціально сформованих тестових наборах даних, що відображають реальні умови шкільних перевезень.
- Запропоновано нову інформаційну систему для автоматизації процесу планування та оптимізації маршрутів шкільних автобусів на основі гібридного підходу, який поєднує переваги алгоритмів Дейкстри та 3-ОРТ. Система має інноваційний інтерфейс та функціонал.
- Проведено апробацію розробленої інформаційної системи з гібридним алгоритмом на реальних даних шкільних перевезень. Отримані результати продемонстрували підвищення ефективності планування маршрутів у порівнянні з існуючими методами.

Таким чином, запропоновані в роботі гібридний алгоритм та інформаційна система є новими розробками, які дозволяють підвищити ефективність та оптимальність маршрутизації шкільних автобусів.

Подальший розвиток системи має потенціал встановлення нових стандартів в організації шкільних перевезень. Зручний інтерфейс, спрощена взаємодія з користувачем та можливість регулярної оптимізації маршрутів з урахуванням змінних умов можуть значно поліпшити якість транспортного обслуговування учнів та задовольнити потреби їхніх батьків у надійних та ефективних шкільних перевезеннях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ

1. Yıldız, E. P., & Baykas, T. P. (2018). School bus routing problem: A review on methods and applications. *Transportation Research Procedia*, 35, 423-431. [Доступно за посиланням: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.11.077>]
2. Dagdeviren, M. (2018). A school bus routing problem considering student preferences: A multi-objective approach. *Computers & Industrial Engineering*, 126, 564-577. [Доступно за посиланням: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.09.038>]
3. Gunawan, A., & Widodo, A. (2020). School bus routing problem: A review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1514(1), 012077. [Доступно за посиланням: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1514/1/012077>]
4. Zhang, Y., & Yang, C. (2020). A bi-objective stochastic programming model for the school bus routing problem. *European Journal of Operational Research*, 284(2), 704-716. [Доступно за посиланням: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.01.036>]
5. Rau, H., Chen, S., & Shih, H. (2015). A hybrid algorithm for the school bus routing problem. *Computers & Operations Research*, 53, 190-199. [Доступно за посиланням: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.09.003>]
6. Fang, C., & Wu, Y. (2018). Optimization of school bus routing and scheduling problem with soft time windows. *Journal of Advanced Transportation*, 2018, 4646927. [Доступно за посиланням: <https://doi.org/10.1155/2018/4646927>]
7. Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. [Доступно за посиланням: <https://a.co/d/2TmUO40>]
8. Dantzig, G., & Ramser, J. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, 6(1), 80-91. [Доступно за посиланням: <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>]

9. Laporte, G., Mercure, H., & Nobert, Y. (1986). An exact algorithm for the school bus routing problem. *Networks*, 16(3), 263-275. [Доступно за посиланням: <https://doi.org/10.1002/net.3230160304>]
10. Toth, P., & Vigo, D. (2002). *The vehicle routing problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics. [Доступно за посиланням: <https://doi.org/10.1137/1.9780898718515>]
11. Cordeau, J.F., Laporte, G., Savelsbergh, M.W., & Vigo, D. (2007). Vehicle routing: problem formulations and algorithms. In C. Barnhart & G. Laporte (Eds.), *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Vol. 14 (pp. 367–428). Elsevier. [Доступно за посиланням: [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)14008-0](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)14008-0)]
12. Bräysy, O., & Gendreau, M. (2005). Vehicle Routing Problem with Time Windows, Part I: Route Construction and Local Search Algorithms. *Transportation Science*, 39(1), 104-118. [Доступно за посиланням: <https://doi.org/10.1287/trsc.1040.0103>]
13. School Bus Tracker [Доступно за посиланням: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.conjoinix.smartparent&hl=en_US&gl=US]
14. SchoolBusManager [Доступно за посиланням: <https://slashdot.org/software/p/School-Bus-Manager/>]
15. Leaflet [Доступно за посиланням: <https://leafletjs.com/>]
16. Park, J. and Kim, B.I. (2010). The school bus routing problem: A review. *European Journal of Operational Research*, 202(2), 311-319. [Доступно за посиланням: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.05.013>]
17. Schittekat, P., Sevaux, M. and Sörensen, K. (2006). A mathematical formulation for a school bus routing problem. In J. Kalcsics and S. Nickel (Eds), *Operations Research Proceedings 2005* (pp. 263-268). Springer, Berlin, Heidelberg. [Доступно за посиланням: https://doi.org/10.1007/3-540-33093-X_42]

18. Dell'Amico, M., Monaci, M., Pagani, C. and Vigo, D. (2007). Heuristic approaches for the fleet size and mix vehicle routing problem with time windows. *Transportation Science*, 41(4), 516-526. [Доступно за посиланням: <https://doi.org/10.1287/trsc.1070.0178>]
19. Pacheco, J., Alvarez, A., Casado, S. and Gonzalez-Velarde, J.L. (2009). A tabu search approach to an urban transport problem in northern Spain. *Computers & Operations Research*, 36(3), 967-979. [Доступно за посиланням: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2007.11.004>]
20. Cheng, C.B. and Wang, K.P. (2009). Solving a vehicle routing problem with time windows using genetic algorithms and a probability model. *International Journal of Production Research*, 47(7), 1855-1872. [Доступно за посиланням: <https://doi.org/10.1080/00207540701452142>]
21. Kontoravdis, G. and Bard, J.F. (1995). A GRASP for the vehicle routing problem with time windows. *ORSA Journal on Computing*, 7(1), 10-23. [Доступно за посиланням: <https://doi.org/10.1287/ijoc.7.1.10>]
22. Vidal, T., Crainic, T.G., Gendreau, M. and Prins, C. (2013). A hybrid genetic algorithm with adaptive diversity management for a large class of vehicle routing problems with time-windows. *Computers & Operations Research*, 40(1), 475-489. [Доступно за посиланням: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.07.018>]
23. Схематичне зображення роботи 3-ОПТ алгоритму [Доступно за посиланням: <https://cs.stackexchange.com/questions/19808/how-does-the-3-opt-algorithm-for-tsp-work>]
24. Схематичне зображення роботи генетичних алгоритмів [Доступно за посиланням: <https://towardsdatascience.com/introduction-to-genetic-algorithms-including-example-code-e396e98d8bf3>]

Додаток 2 до наказу
від «31» березня 2023 року
№119/05

ДЕКЛАРАЦІЯ

про дотримання академічної доброчесності

Я, _____

Повністю вказується ПІБ та статус (посада для працівників, освітня (освітньо-наукова) програма – для здобувачів вищої освіти)

що нижче підписалась/підписався, розуміючи та підтримуючи загальновизнані засади справедливості, доброчесності та законності,

ЗОБОВ'ЯЗУЮСЬ:

дотримуватися принципів та правил академічної доброчесності, що визначені законодавством України, локальними нормативними актами Донецького національного університету імені Василя Стуса, положеннями, правилами, умовами, визначеними іншими суб'єктами, та не допускати їх порушення.

ПІДТВЕРДЖУЮ:

що мені відомі положення статті 42 Закону України «Про освіту»;
що у даній роботі не представляла/представляв чийсь роботи повністю або частково як свої власні. Там, де я скористалася/скористався працею інших, я зробила/зробив відповідні посилання на джерела інформації;

що дана робота не передавалась іншим особам і подається вперше, не порушує авторських та суміжних прав закріплених статтями 21-25 Закону України «Про авторське право та суміжні права», а дані та інформація не отримувались в недозволеній спосіб.

УСВІДОМЛЮЮ:

що ця робота може бути перевірена університетом на плагіат або інші порушення академічної доброчесності, в тому числі з використанням спеціалізованих сервісів;

що у разі порушення академічної доброчесності, до мене можуть бути застосовані процедури, передбачені законодавством України та Кодексом академічної доброчесності та корпоративної етики Донецького національного університету імені Василя Стуса, іншими локальними нормативними актами університету, та я можу бути притягнута/притягнутий до академічної відповідальності.

(дата)

(підпис)