

DOI 10.26886/2520-7474.4(36)2019.1

UDC 004.9+519.87

THE VEHICLE ROUTING PROBLEM WITHIN THE INFORMATION SYSTEM FOR CITY ROAD MAINTENANCE PLANNING

H. Hryhorets, O. Zhdanova, PhD, Associate Professor

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, Kyiv

The work is devoted to information system for city road maintenance planning. The main component of this system is the vehicle routing problem while servicing the city's transportation network when performing such operations as clearing roads from rubbish, dirt and dust, creating road markings, clearing snow and spreading anti-icing materials. Mathematically, the problem is reduced to a Min-Max Capacitated k -Chinese Postman Problem with Deadline Classes. An additional feature of the considered problem is the consideration of traffic intensity on the roads. The modification of the general algorithm for solving the problem takes into account the characteristic properties of the model. Considered the components of the developed information system for city road maintenance planning which can be used in the future by municipal services when planning routes during performance of certain types of road works.

Key words: vehicles routing, road maintenance, MM k -CCPP with DC, planning system, traffic intensity, vehicle capacity.

Григорєць Г. О.; кандидат технічних наук, доцент, Жданова О. Г. Задача транспортної маршрутизації у складі інформаційної системи планування обслуговування доріг міста / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна, Київ

Робота присвячена інформаційній системі планування обслуговування доріг міста. Основною складовою цієї системи є задача складання маршрутів пересування транспортних засобів при обслуговуванні транспортної мережі міста для виконання таких робіт як очищення доріг від сміття, бруду і пилу, створення дорожньої розмітки, прибирання снігу та розповсюдження протижеледних матеріалів. Математично задача зводиться до моделі задачі мінімаксу k китайських листонош з врахуванням директивних термінів виконання робіт та місткості машин (Min-Max Capacitated k -Chinese Postman Problem with Deadline Classes). Особливістю розглянутої задачі є врахування інтенсивності дорожнього руху на дорогах. Розроблена модифікація загального алгоритму вирішення задачі враховує особливості моделі. Розглянуто складові розробленої інформаційної системи планування обслуговування доріг міста, яка в подальшому може використовуватися муніципальними службами при плануванні маршрутів під час виконання певних видів дорожніх робіт.

Ключові слова: маршрутизація транспортних засобів, обслуговування доріг, MM k -CCPP with DC, система планування, інтенсивність дорожнього руху, місткість транспортного засобу.

Вступ. Обслуговування доріг міста перш за все стосується процесу якісного планування маршрутів, а у великих масштабах це стає дуже складною задачею оптимізації. Саме тому при складанні маршрутів доцільною є автоматизація процесу планування через розробку системи, що матиме можливість динамічної побудови маршрутів з урахуванням ряду обмежень та буде актуальною на сьогоднішній час.

В цій області було проведено чимало досліджень та запропоновано ряд практичних вирішень: сформульовано нові моделі задач, створено та вдосконалено алгоритми побудови допустимих розв'язків, розроблено різні програмні продукти та ін. Аналіз досягнень дозволив визначити основні особливості та потреби процесу обслуговування доріг і необхідні критерії для реалізації системи його планування.

Актуальність проблеми. Мережа автомобільних доріг є важливою складовою частиною функціонування будь-якої галузі державної діяльності, тому її технічний стан безпосередньо впливає на економічний розвиток як окремих областей, так і країни в цілому. Отже, необхідно використовувати ефективні методи організації підтримання справного стану доріг, які в свою чергу забезпечать безпечний рух транспортних засобів та збереження дорожнього покриття. При цьому треба також враховувати і економічну складову при виконанні якісних дорожніх робіт, щоб уникнути великих витрат або навіть збитків.

Обслуговування доріг складається з цілого комплексу різних видів робіт, що виконуються в залежності від кліматичних або погодних умов, інтенсивності руху на дорогах та ін. Побудова маршрутів при проведенні робіт з обслуговування доріг є трудомістким процесом, бо необхідно враховувати ряд обмежень, які динамічно змінюються, пройдену відстань, час та вартість обслуговування.

Огляд існуючих рішень. Багато фахівців з усього світу вивчають цю проблему з наукової точки зору та пропонують її практичні вирішення. Вони спираються на її математичні особливості як задачі оптимізації, що пов'язана з маршрутизацією транспортних

засобів. Більшість зосереджується на добре відомій задачі k китайських листонош (k -Chinese Postman Problem). Інші зосереджені на експлуатаційних та практичних аспектах проблеми. Таким чином, при об'єднанні обох точок зору на дану проблему були запропоновані різні підходи та навіть системи планування маршрутів, що основані на розв'язанні математичних задач.

Модель задачі про китайського листоношу, що полягає у знаходженні шляху найменшої вартості, який проходить кожну дугу графу принаймні один раз, вперше була розроблена математиком Mei-Ku Kuan [1] у 1962 році. Це стало поштовхом до подальших наукових досліджень іншими вченими, в результаті чого були створені нові класи задач та методи їх розв'язання. Так у 1974 році Orloff [2] сформулював задачу про сільського листоношу, яка те ж є задачею маршрутизації по дугам з тією особливістю, що лише підмножина дуг є обов'язковою для проходження. Задачу мінімаксу k китайських листонош, метою якої є побудова таких k маршрутів, щоб довжина найдовшого маршруту має бути мінімальною, розробив Frederickson [3] у 1978 році. Golden і Wong [4] у 1981 році запропонували модель задачі маршрутизації по дугам з врахуванням місткості транспортних засобів.

Дослідження задач маршрутизації продовжується по сьогоднішній день. Розглянемо детальніше декілька з них, які були висвітлені у наукових роботах протягом недавнього часу.

Mustafa Yilmaz та Merve Kayaci Codur [5] використовують різні варіанти моделей задачі k китайських листонош (k -CPP) при процесах прибирання снігу на території університету Ататюрка. Вони зосереджені на знаходженні маршрутів для транспортних засобів, що охоплюють всі дороги принаймні один раз з мінімальними витратами.

Проте цього недостатньо для ефективного застосування на практиці. По-перше, можливість планувати маршрути передбачена лише для зимового утримання доріг, до якого відносяться очищення проїжджої частини від снігу та розподілення суміш піску і солі проти заледеніння. Однак в літні періоди на дорогах також виконуються роботи, серед яких мийка дорожнього покриття, очищення від сміття, бруду та пилу, нанесення або відновлення зношеної розмітки. Час обслуговування для кожної дороги залежить від виду робіт. Тому в такій реалізації неможливо оцінити загальні вартість та час обслуговування, окрім зимового періоду часу, що суттєво звужує її область застосування. По-друге, зазвичай дороги відрізняються за важливістю порядку обслуговування, що тут також не враховується. Правильно розставлена пріоритетність дозволить, наприклад, у найкоротші терміни відновити транспортний рух. І по-третє, у разі виникнення непередбачуваних ситуацій вдовж побудованого маршруту (аварії, затору, перекриття дороги тощо) транспортні засоби не будуть в змозі їх уникнути, що спричинить значні затримки по часу та додаткові витрати. Авторами роботи також передбачено, що сніг буде прибиратися з доріг та тротуарів шляхом завантаження його у транспортні засоби та подальшого транспортування до місць захоронення протягом зими. При цьому не враховується місткість цих транспортних засобів. Це можна пояснити тим, що розглядається виконання таких робіт лише на території університету. Тому передбачається, що місткість машин не може бути перевищена з огляду на невелику площу території. Проте якщо брати до розгляду більшу територію, таку як район міста або місто в цілому, то враховувати такий показник вкрай необхідно.

В роботі [6] Kaj Holmberg зі Швеції описує більш вдосконалений підхід до вирішення проблеми, оснований на задачі комівояжера з

використанням евристичного методу пошуку допустимих рішень. Kaj Holmberg так само, як і попередньо розглянуті автори, зосереджується на процесі прибирання снігу, що є найбільш актуальним у північних країнах. Однак в його підході місто поділяється на невеликі за площею райони, до кожного з яких закріплюється свій транспортний засіб. Також враховується те, що можуть бути як односторонні, так і двосторонні вулиці, тобто орієнтовані та неорієнтовані дуги графу. Крім того, існують дороги, які не потребують обслуговування, але можуть використовуватися для транзитного проходження транспортними засобами. Проте в даному підході також немає можливості враховувати рівень завантаженості доріг. Слід зазначити, що було б краще не тільки поділяти місто на певні ділянки, а ще задавати час, до якого потрібно виконати роботу на цих ділянках. Це відповідає тому як у реальному житті працюють робітники, що займаються обслуговуванням доріг, та дозволяє більш точно складати плани робіт.

Система планування маршрутів, що була розроблена Joris Kinable, Willem-Jan van Hooft, Stephen F. Smith, є найбільш подібною до системи, що була розроблена у даній роботі та особливості якої будуть більш детально розглянуті нижче у даній статті. Вчені зі штату Пенсильванія розглядають проблему з точки зору динамічної маршрутизації транспортних засобів та наводять свій підхід до управління та оптимізації руху снігоочисників, оскільки вони також сфокусовані лише на проблемі очищення доріг від снігу у місті Піттсбург [7]. Їхньою головною задачею є побудова покрокових планів для транспортних засобів та динамічний перегляд цих планів під час проведення обслуговування у разі виникнення непередбачуваних подій. Вважається, що кожний транспортний засіб одночасно очищує сніг з вулиць та розповсюджує суміш солі та хімікатів. У системі враховується те, що місткість солі та обсяг палива є обмеженими

ресурсами та періодично мають бути поповненими на одному із доступних депо. Також дороги поділені на класи пріоритетів таким чином, що кожна дорога належить лише одному з класів. Зрозуміло, що дороги з високим пріоритетом повинні бути очищені до доріг з більш низьким пріоритетом. Таким чином, при побудові детального маршруту для кожного транспортного засобу враховуються обмеження на пріоритетність доріг та обсяг наявних ресурсів. Проте система має і свої недоліки. Наразі це лише офлайн версія для демонстрації процесу побудови статичних маршрутів. Врахування фактичних умов дорожнього руху та непередбачуваних подій розглядається авторами лише у подальшій перспективі при переході на онлайн версію системи. Як зазначено у їхній статті, про різні зміни ситуації на дорогах повинні будуть повідомляти самі водії транспортних засобів. Також відсутня практична реалізація для застосування цієї системи при виконанні інших видів дорожніх робіт.

Постановка задачі. Перейдемо до більш детального розгляду характерних особливостей, які повинні бути розглянуті та враховані при розробці інформаційної системи планування обслуговування доріг міста.

Інформаційна система планування обслуговування доріг міста призначена для полегшення та підвищення ефективності процесу складання планів проходження доріг міста спеціалізованою дорожньою технікою при виконанні певних видів робіт на дорогах.

Для роботи з системою необхідно мати таку інформацію: вид робіт, час початку їх виконання, кількість доступних транспортних засобів, обсяг ресурсу, що потрібен для виконання робіт, та перелік вулиць, яким потрібно надати обслуговування.

При побудові маршрутів для транспортних засобів система має враховувати наступні особливості процесу обслуговування доріг:

тривалість обслуговування в залежності від виду робіт, пріоритетність доріг, директивні терміни, рівень інтенсивності дорожнього руху та місткість машин.

Спочатку мають складатися плани проходження доріг для кожного з транспортних засобів перед початком обслуговування та враховувати завантаженість руху на дорогах у поточний момент часу. У разі виникнення в процесі обслуговування на дорогах непередбачуваних ситуацій, що підвищують рівень завантаженості руху на певних відрізках шляхів та можуть спричинити значне збільшення часу обслуговування, а, як наслідок, і вартості, початкові шляхи повинні бути скореговані таким чином, щоб уникнути проїзду по ділянкам зі значною інтенсивністю руху.

Слід вказати, що кожна дорога для обслуговування має співвідноситись з одним із класів пріоритетів та лише з одним, а всі класи пріоритетів повинні мати відповідні їм директивні терміни. У свою чергу директивні терміни не мають перетинатися по часу один із одним. Також необхідно враховувати те, що деякі види робіт потребують використання певних вичерпних ресурсів, таких як суміш піску і солі, що використовується для запобігання заледеніння доріг. В цьому випадку треба враховувати кількість обсягу цього ресурсу, що може бути завантажена у машину, та відстань, на яку його вистачить, щоб уникнути ситуації, коли здійснити обслуговування доріг на певній частині маршруту буде неможливо через нестачу потрібного ресурсу. При виконанні деяких інших видів робіт, таких як збір сміття, потрібно складати маршрути з урахуванням обсягу доступного місця у машині з аналогічних причин – може скластися ситуація, коли транспортний засіб не зможе забрати сміття з певних доріг через брак місця для його завантаження.

Математична модель. В даній роботі вирішення проблеми планування обслуговування доріг основане на розв'язанні задачі мінімаксу k китайських листонош з врахуванням директивних термінів виконання робіт та місткості машин (ММ k -ССРР with DC). Обґрунтування вибору моделі задачі засноване на [8], де можна ознайомитися з формулюванням проблеми. Модель задачі та алгоритм її розв'язання були розроблені шляхом модифікації математичної постановки, яка описана в [9], та алгоритму побудови допустимих розв'язків, що наведений у [10].

Далі наведено загальний опис математичної постановки ММ k -ССРР with DC.

Візьмемо до розгляду деякий район міста, що потребує обслуговування. Тоді кожну дорогу в цьому районі можна представити як дугу, а всю мережу доріг в цілому – як граф. Відповідно до цього введемо деякі позначення:

- а) $V = \{v_0, v_1, v_2, \dots\}$ – множина вершин графа, у якій $v_0 \in V$ – це вершина-депо;
- б) $A = \{a_1, a_2, \dots\}$ – множина дуг, $S \subset A$ – множина дуг для обслуговування, $C \subset A$ – множина транзитних дуг, $S \cup C = A$;
- в) s_i – час, за який відбувається обслуговування на дузі $a_i \in S$;
- г) c_i – час проходження по дузі $a_i \in C$ без обслуговування (транзитне проходження);
- д) $R = \{r_1, r_2, \dots\}$ – множина необхідних обсягів ресурсів для обслуговування дуги $a_i \in S$;
- е) $D = \{d_1, d_2, \dots\}$ – множина балів завантаженості руху на дугах;
- ж) z_i – коефіцієнт рівня інтенсивності руху на дузі a_i ;
- з) Q – місткість одиниці спеціалізованої дорожньої техніки (далі – машини, вважається, що всі машини є ідентичними).

Кожній дузі проставляється відповідний пріоритет для створення порядку на обслуговування, що дозволяє розділити множину дуг A на декілька класів пріоритетів, де кожна дуга може належати лише одному з класів.

Для класу пріоритетів встановлюється певний директивний термін, причому дані директивні терміни не перетинаються один з одним по часу. Ця умова дозволяє досягти того, що всім дугам певного пріоритету надасться обслуговування до заданого часового обмеження.

Необхідно знайти k маршрутів, де k – кількість наявних одиниць спеціалізованої дорожньої техніки. При цьому кожна дуга може обслуговуватися тільки на одному з маршрутів і лише один раз, а всі маршрути мають починатися та закінчуватися у депо.

Оскільки спеціалізована дорожня техніка характеризується заданою місткістю Q , то загальний обсяг ресурсу, необхідний для обслуговування певного маршруту, не може бути більший за місткість машини.

Загальний час проходження маршруту одиницею спеціалізованої дорожньої техніки визначається в залежності від кількості дуг обслуговування на маршруті, кожній з яких надається обслуговування за час s_i , та кількості транзитних проходжень за час c_i для кожної дуги.

Цільовою функцією задачі є мінімізація часу проходження маршруту з найбільшим загальним часом проходження, тобто маємо задачу мінімаксу.

Процес побудови k маршрутів (після визначення всіх вхідних даних) для ММ k -CCPP with DC складається з трьох етапів.

Етап 1. Знаходження «простих» маршрутів відповідно до кількості дуг, де «простий» маршрут представляє собою найкоротший шлях від вершини-депо v_0 до однієї з дуг обслуговування a_i , власне дуги a_i та

найкоротший шлях від дуги обслуговування a_i назад до вершини-депо v_0 , а довжини дуг є часом транзитного проходження c_i . Найкоротші шляхи між вершинами знаходяться за допомогою алгоритму Дейкстри [11].

На цьому етапі підраховуються час проходження кожного з маршрутів, час завершення обслуговування всіх дуг у цих маршрутах та необхідні обсяги ресурсів, що витрачаються під час обслуговування.

Визначається бал завантаженості d_i та відповідний йому коефіцієнт рівня інтенсивності z_i дорожнього руху для кожної дуги, не зважаючи на те чи це дуга обслуговування, чи дуга транзитного проходження. В залежності від цих значень регулюються час обслуговування s_i та час транзитного проходження c_i : збільшуються на визначений коефіцієнт z_i ($s_i^* = s_i z_i$ та $c_i^* = c_i z_i$) або залишаються незмінними у разі низької завантаженості дорожнього руху ($d_i = 1$). Рівні завантаженості дорожнього руху взяті із сервісу «Яндекс.Пробки»: вимірюються в балах та приймають значення від 1 до 10. Приблизні значення у 1-2 бали відповідають практично вільному руху на дорогах, 4-5 балів – ускладненому руху, а бали вище 7 говорять про серйозні багатокілометрові затори.

Етап 2. Злиття маршрутів для отримання допустимого розв'язку задачі, тобто побудова k маршрутів з виконанням обмежень на директивні терміни та місткість машин.

Злиття маршрутів відбувається за наступною схемою.

- 1) Знаходимо маршрут з найменшим часом проходження.
- 2) Знаходимо маршрут, який буде включати в себе всі дуги маршруту з кроку 1.

- 3) На основі двох маршрутів будуємо новий, у якому дуга a_i буде дугою обслуговування, якщо вона обслуговується у одному з маршрутів.
- 4) Перераховуємо всі значення для отриманого маршруту (час проходження, час завершення обслуговування дуг, кількість задіяних ресурсів).
- 5) Якщо отримані значення задовольняють обмеженням, то злиття відбулось успішно. Якщо ні, то злиття цих маршрутів зробити неможливо, тому обираємо наступний маршрут.

Етап 3. Об'єднання маршрутів так, щоб при цьому час проходження об'єднаного маршруту був якомога меншим та виконувались обмеження на директивні терміни і обсяг ресурсів. Завдяки цьому покращується розв'язок задачі через врівноваження найкоротших і найдовших маршрутів.

На даному кроці намагаємось знайти таке об'єднання, щоб доступних ресурсів вистачало на його обслуговування. В такому разі транспортні засоби можуть продовжувати обслуговування, не потребуючи додаткових зупинок на поновлення ресурсів. Тоді об'єднання буде складатися із частини першого маршруту від вершини-депо v_0 до останньої дуги обслуговування a_i на першому маршруті включно та з частини другого маршруту від першої дуги обслуговування a_j на цьому маршруті включно до вершини-депо v_0 . Якщо ж доступного обсягу ресурсів не вистачає на обслуговування обох маршрутів, то маршрути об'єднуються у початковому вигляді. Тоді по завершенню обслуговування першого маршруту транспортний засіб повертається у вершину-депо v_0 , де може поновити необхідні ресурси, та лише після цього вирушає на обслуговування другого маршруту. Слід зауважити, що в обох випадках повинні виконуватися умови

директивних термінів. Якщо ці умови не виконуються, то такий маршрут злити неможливо, тому переходимо до розгляду наступного маршруту.

Умовою завершення роботи алгоритму на будь-якому з етапів є побудова k або менше маршрутів. Якщо маршрути побудувати неможливо, то необхідно скорегувати вхідні дані (наприклад, змінити директивні терміни або збільшити кількість машин).

В процесі виконання обслуговування через певні визначені проміжки часу оновлюється інформація щодо завантаженості руху на дорогах (дугах). Оновлення відбувається лише для п'яти передуючих доріг. Це зроблено для того, щоб уникнути зайвих змін послідовності дуг у маршрутах у випадку, коли транспортний засіб знаходиться на великій відстані від певної дуги з ускладненим рухом. Ситуація на дорогах постійно змінюється, тому можливо, що до того часу, як транспортний засіб буде проходити таку дугу, рівень інтенсивності руху суттєво знизиться і необхідність корегування маршруту буде відсутня.

Якщо в результаті деякої непередбачуваної ситуації рух на дорозі став ускладненим ($d_i \geq 6$), то будується маршрут, побудований з урахуванням початкових даних, корегується таким чином, щоб обійти дуги з високою інтенсивністю руху. Якщо такий маршрут існує, то будемо його:

- а) від вершини v_i дуги з поточним місцезнаходженням транспортного засобу до вершини v_j дуги, для якої $d < 6$ (якщо між цими дугами немає дуг обслуговування);
- б) від вершини v_i дуги з поточним місцезнаходженням транспортного засобу до вершини v_j , в якій починається наступна дуга-обслуговування (якщо $d_i \geq 6$ для дуги обслуговування, тому що обслуговування повинно відбутися у будь-якому разі).

Для побудови проміжних шляхів між двома вершинами використовується добре відомий алгоритм Дейкстри. Припускаємо, що при $d_i < 6$ коефіцієнт z_i досить незначний, тому відсутня необхідність корегування маршрутів.

Якщо такого маршруту не існує, то транспортний засіб рухається по початковому маршруту.

Винятки, у разі яких транспортний засіб продовжує рух по дузі з ускладненим рухом:

- а) якщо час проходження найкоротшого проміжного шляху від вершини v_i до вершини v_j більше або дорівнює часу проходження частини початкового маршруту з високою інтенсивністю руху;
- б) якщо дуга з ускладненим рухом є дугою обслуговування.

Останнє обумовлено тим, що обслуговування має бути надане цій дузі обслуговування у будь-якому випадку, тому якщо не надати їй обслуговування на поточному етапі, то до неї доведеться повертатися пізніше, а це збільшить загальний час проходження маршруту та відстань, що проходить транспортний засіб.

Програмна реалізація. При розробці програмної реалізації інформаційної системи планування обслуговування доріг, крім виконання якісного планування маршрутів з врахуванням всіх обмежень, було приділено увагу ще й її зручності, простоті та наочності при використанні потенційними користувачами.

Робота з системою основана на використанні відкритої географічної карти OpenStreetMap [12]. На початку роботи користувач одразу бачить певну область на карті, для якої потрібно скласти план обслуговування. На даний момент для демонстрації роботи системи використовується Солом'янський район міста Києва. Для побудови початкових маршрутів спочатку користувачу потрібно обрати на карті дороги, які мають бути

обслуговані, та вказати для них пріоритетність. Такий спосіб введення схеми доріг для обслуговування дозволяє спростити процес керування мережею доріг. До того ж в системі наявна можливість зберігати створену схему доріг з можливістю її повторного використання в подальшому (при умові, що було обрано більше 5 доріг).

Після визначення переліку доріг та їх пріоритетності користувачу потрібно вказати наступну інформацію: вид виконуваних робіт, місце розташування депо, кількість доступної спеціалізованої техніки, місткість однієї одиниці техніки, час початку обслуговування, директивні терміни (часові обмеження) для кожного з класів пріоритетів.

На основі отриманих вхідних даних система намагається побудувати початкові маршрути. У разі, коли це зробити неможливо, система виводить відповідне повідомлення та повертається на етап створення схеми доріг. Інакше система виводить повідомлення про те, що маршрути були побудовані та розв'язок задачі знайдено, а також відомості щодо кількості задіяних одиниць дорожньої техніки, загального часу обслуговування та ін. Якщо користувача задовольняє отриманий результат та він хоче використати складені плани на практиці, система відправляє ці плани з маршрутами по електронній пошті напряму до водіїв. Використання у системі Google Sheets API [13] дозволяє формувати плани онлайн у вигляді документів Excel. Це також є зручним інструментом у разі корегування початкових маршрутів в результаті зміни інтенсивності руху на дорогах. В такому разі інформація стосовно маршруту оновлюється у документі через незначний проміжок часу, тому водії завжди матимуть актуальні плани маршрутів.

На сьогоднішній день в системі також наявний симулятор руху транспортних засобів для візуалізації процесу. Після отримання

допустимих розв'язків задачі на карті будується граф, що відповідає схемі всіх доріг. Машина починають свій рух по графу відповідно до складених маршрутів. Дуги графу позначаються кольорами в залежності від їхнього стану (потрібно надати обслуговування, в процесі обслуговування, обслуговування завершено). В разі експлуатації системи на практиці симулятор руху може бути видалений.

Висновки. У статі було продемонстровано особливості інформаційної системи планування обслуговування доріг міста, в основу якої покладено пошук допустимих рішень MM k-CCPP with DC. Наведено загальний опис алгоритму побудови маршрутів, детально розглянуто як система враховує рівень інтенсивності руху на дорогах та вирішує проблему заторів під час обслуговування. Окрім математичної складової, описано головні принципи роботи користувача з програмою, звідки можна зробити висновок, що інформаційна система є зручною та зрозумілою для кінцевого користувача і з легкістю може використовуватися за призначенням.

Порівняно із іншими аналогічними підходами до процесу обслуговування доріг, інформаційна система планування, що була розроблена, має ряд переваг:

- наочність у користуванні завдяки використанню реальної географічної карти міста;
- побудова маршрутів з урахуванням виду виконуваних робіт;
- поділ доріг за їх пріоритетністю;
- встановлення часових обмежень (директивних термінів) на виконання обслуговування;
- врахування місткості одиниці спеціалізованої дорожньої техніки;
- врахування завантаженості руху на дорогах;

- корегування маршрутів у разі непередбачуваних дорожніх ситуацій під час процесу обслуговування;
- доступність документів з маршрутами онлайн та їх швидке оновлення у випадку внесення змін.

Однак система не є досконалою та має перспективи для подальшого покращення. Наприклад, наразі в системі не враховується кількість смуг на дорогах та напрямок руху кожної з них. Врахування цих особливостей дозволить досягти більш якісного планування маршрутів. Також на схемі доріг, що розглядається у інформаційній системі, не представлені невеликі дороги та проїзди, наприклад, між житловими будинками та дворами. Завдяки подальшому розширенню схеми доріг для обслуговування можна отримати краще покриття надання обслуговування для певної частини або району міста.

Література:

1. Mei-Ko Kwan. (1962). Graphic programming using odd or even points. *Chinese Mathematics*, 1, 273-277.
2. Orloff, C.A. (1975). A fundamental problem in vehicle routing. *Networks*, 4, 35-64.
3. Frederickson, G.N., Hecht M.S., Kim C.E. (1978). Approximation algorithms for some routing problems. *Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, 17, 216-227.
4. Golden, B.L., Wong R.T. (1981). Capacitated arc routing problems. *Networks*, 11, 305-315.
5. Yilmaz, M., Codur, M.K. (2016). *k*-Chinese Postman Problem Approach for Snow Plowing Operations: A Case Study. *3rd International Conference on Recent Advances in Pure and Applied Mathematics (May 19-23, 2016, Bodrum)*, 3, 218.

6. Holmberg, K. (2019). The (Over) Zealous Snow Remover Problem. *Transportation Science*, 53, 623-656.
7. Kinable, J., Smith, S.F. (2016). *Plowing the streets of Pittsburgh; an integrated solution approach*.
8. Григорець, Г.О. (2018). Застосування задачі маршрутизації транспортних засобів по дугах для оптимізації процесів обслуговування доріг міста. *Математичне та імітаційне моделювання систем: матеріали Тринадцятої міжнародної науково-практичної конференції МОДС 2018 (25-29 червня 2018 р., м. Чернігів)*, 103-106.
9. Жданова, О.Г., Невмержицька, С.І. (2014). Математична модель мінімаксної задачі k китайських листонош з врахуванням директивних термінів. *Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: матеріали X Міжнародної наукової конференції ISDMCI'2014 (28-31 травня 2014 р., м. Херсон)*, 217-219.
10. Жданова, О.Г., Невмержицька, С.І. (2014). Побудова допустимого розв'язку мінімаксної задачі k китайських листонош з врахуванням директивних термінів. *Сучасні інформаційні технології: матеріали V Всеукраїнської заочної науково-практичної конференції СІТ-2014 (29-30 листопада 2014 р., м. Київ)*, 16-20.
11. Алгоритм Дейкстры – Википедия. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_Дейкстры> (2019, липень, 16).
12. OpenStreetMap Україна. <<http://openstreetmap.org.ua>> (2019, червень, 28).
13. Google Sheets API. <<https://developers.google.com/sheets/api/>> (2019, червень, 28).

References:

1. Mei-Ko Kwan. (1962). Graphic programming using odd or even points. *Chinese Mathematics*, no. 1, 273-277. [in English].
2. Orloff, C.A. (1975). A fundamental problem in vehicle routing. *Networks*, no. 4, 35-64. [in English].
3. Frederickson, G.N., Hecht M.S., Kim C.E. (1978). Approximation algorithms for some routing problems. *Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, no. 17, 216-227. [in English].
4. Golden, B.L., Wong R.T. (1981). Capacitated arc routing problems. *Networks*, no. 11, 305-315. [in English].
5. Yilmaz, M., Codur, M.K. (2016). *k*-Chinese Postman Problem Approach for Snow Plowing Operations: A Case Study. *3rd International Conference on Recent Advances in Pure and Applied Mathematics (May 19-23, 2016, Bodrum)*, no. 3, 218. [in English].
6. Holmberg, K. (2019). The (Over) Zealous Snow Remover Problem. *Transportation Science*, no. 53, 623-656. [in English].
7. Kinable, J., Smith, S.F. (2016). *Plowing the streets of Pittsburgh; an integrated solution approach*. [in English].
8. Hryhorets, H.O. (2018). Zastosuvannia zadachi marshrutyzatsii transportnykh zasobiv po duhakh dlia optymizatsii protsesiv obsluhovuvannia dorih mista [Application of the vehicle routing problem for processes optimization of roads service]. *Matematychna ta imitatsiine modeliuвання system: materialy Trynadtsiatoi mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii MODS 2018 (25–29 chervnia 2018 r., m. Chernihiv)*. [Mathematical Modeling and Simulation of Systems: materials of the XIII International Scientific-Practical Conference MODS 2018 (June 25-29, 2018, Chernihiv)], 103-106. [in Ukrainian].
9. Zhdanova, O.H., Nevmerzhytska, S.I. (2014). Matematychna model minimaksnoi zadachi *k* kytais'kykh lystonosh z vrakhuvanniam dyrektyvnykh

terminiv [Mathematical model of the min-max k -Chinese Postman Problem with deadline classes]. *Intelektualni systemy pryiniattia rishen i problemy obchysliuvalnoho intelektu: materialy X Mizhnarodnoi naukovoï konferentsii ISDMCI'2014 (28-31 travnia 2014 r., m. Kherson)*. [Intellectual Systems of Decision-Making and Problems of Computational Intelligence: materials of the X International Scientific Conference ISDMCI'2014 (May 28-31, 2014, Kherson)], 217-219. [in Ukrainian].

10. Zhdanova, O.H., Nevmerzhytska, S.I. (2014). Pobudova dopustymoho rozv'iazku minimaksnoi zadachi k kytayskykh lystonosh z vrakhuvanniam dyrektyvnykh terminiv [Solving of the min-max k -Chinese Postman Problem with deadline classes]. *Suchasni informatsiini tekhnolohii: materialy V Vseukrainskoi zaochnoi naukovo-praktychnoi konferentsii SIT-2014 (29-30 lystopada 2014 r., m. Kyiv)*. [Modern Information Technologies: materials of the V Ukrainian Scientific Conference (November 29-30, 2014, Kyiv)], 16-20. [in Ukrainian].

11. Algoritm Deykstryi – Vikipediya [Dijkstra's algorithm – Wikipedia]. Retrieved from http://ru.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_Дейкстры. [in Russian]. (2019, July, 16).

12. OpenStreetMap Ukraina [OpenStreetMap Ukraine]. Retrieved from <http://openstreetmap.org.ua>. [in Ukrainian]. (2019, June, 28).

13. Google Sheets API. Retrieved from <https://developers.google.com/sheets/api/>. [in English]. (2019, June, 28).