

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES

ПРОГРЕССИВНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 528.29

МЕТОДИКА ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТУ РУХУ КОЛОНИ ТЕХНІКИ ПО НЕСТАЦІОНАРНІЙ МЕРЕЖІ ДОРІГ

Боровик О. В. – д-р техн. наук, професор, заступник ректора з навчальної роботи, Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького, Хмельницький, Україна.

Рачок Р. В. – д-р техн. наук, доцент, начальник кафедри загальнонаукових та інженерних дисциплін, Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького, Хмельницький, Україна.

Боровик Л. В. – д-р пед. наук, доцент, професор кафедри загальнонаукових та інженерних дисциплін, Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького, Хмельницький, Україна.

Купельський В. В. – ад'юнкт, Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького, Хмельницький, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Ефективне вирішення значного числа прикладних задач, що стосуються перевезень, у ряді випадків залежить від вдалого вибору маршруту руху. Побудова оптимальних маршрутів на розміченому графі, що описує мережу доріг і який має сталі ваги ребер, є класичним і детально вивченим завданням. Проте в багатьох застосуваннях виникає потреба врахування можливої динаміки зміни в часі ваг ребер, що відповідає випадкам зміни дорожніх умов. Останнє вимагає розвитку відповідного науково-методичного апарату.

Мета. Метою роботи є розробка методики вибору оптимального маршруту руху колони техніки по нестационарній мережі доріг у розумінні змінності ваг ребер графа, що відповідає цій мережі.

Метод. У роботі запропонована математична модель вибору оптимального маршруту руху колони техніки по мережі доріг. Для опису мережі доріг використаний граф. Критерієм оптимальності при виборі маршруту руху є мінімізація часу, який витрачається на пересування. Особливістю моделі є врахування можливості динамічної зміни ваг ребер графу при реалізації пересування колони техніки по обраному маршруту. На основі використання даної моделі запропонована методика, яка забезпечує вибір оптимальних маршрутів руху для дискретно-стохастичного, дискретно-детермінованого та неперервно-невизначеного випадків зміни ваг ребер графу.

Результати. У статті запропоновано алгоритми, що забезпечують розв'язування задачі вибору оптимального маршруту в умовах нефіксованої в часі ваги ребер, які описують мережу доріг, а також показано особливості застосування алгоритмів. З використанням розробленого програмного забезпечення досліджений варіант мережі доріг з нестационарною вагою ребер. На прикладі показано недосконалість рішень щодо вибору оптимального маршруту при нестационарній вазі ребер графу, отриманих з використанням класичних методів.

Висновки. Неврахування можливої зміни дорожньої обстановки, що проявляється зміною в часі ваг ребер графа, який описує мережу доріг, може призвести до неоптимальності отримуваних рішень з використанням класичних методів пошуку найкоротшого маршруту в графі. Для отримання оптимальних маршрутів з врахуванням зміни в часі дорожньої обстановки при русі колони, можливо використати запропоновану у даному дослідженні методику. Отримані результати розширюють можливості щодо вирішення задач в галузі дискретної оптимізації з врахуванням динаміки зміни обстановки при реалізації оптимальних розв'язків.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: оптимізація маршруту, граф, метод Дейкстри.

НОМЕНКЛАТУРА

$f_{(i,j)}(t)$ – первісна функції $v_{(i,j)}(t)$ на проміжку $[t_0(i,j); t_0(i,j) + t(i,j)]$;

$f_{(i,j)}^{-1}$ – функція, що обернена до функції $f_{(i,j)}(t)$ на проміжку $[t_0(i,j); t_0(i,j) + t(i,j)]$.

n – кількість вершин графа, що описує мережу доріг;

$\{i, j\}$ – ребро графа, що з'єднує вершини i та j ;

l – кількість видів транспортних засобів;

$\Delta L_{(i,j)}$ – відома довжина шляху між точками 0 і s ребра $\{i, j\}$;

$T^{(i)}$ – тривалість реалізації i -го альтернативного шляху між вершинами графа a і z ;

$t_s(i,j)$ – момент часу, в який колона техніки перебуває в точці s ;

$t_0(i,j)$ – момент часу, в який колона техніки перебуває в точці, яка відповідає вершині графа i ;

$\Delta L_{\omega(i,j)}$ – довжина шляху між точками $\omega-1$ і ω ребра $\{i, j\}$;

$v_k[t_{\omega-1(i,j)}; t_{\omega(i,j)}]$ – швидкість k -го виду техніки на часовому проміжку $[t_{\omega-1(i,j)}; t_{\omega(i,j)}]$ ребра $\{i, j\}$;

$W^{(i)} = (w_{ij}^{(i)})_{n \times n}$ – матриця ваг графа;

$w_{ij}^{(i)}$ – вага ребра $\{v_i, v_j\}$ у момент перебування у вершині v_i ;

$V = (v_{ij})_{n \times n}$ – матриця швидкостей руху вздовж ребер графа;

v_{ij} – швидкість руху вздовж ребра $\{v_i, v_j\}$ у фіксований момент t , тобто $v_{ij} = f_{ij}(t)$ (функції $f_{ij}(t)$ можуть бути різними в залежності від того, вздовж якого ребра здійснюється рух);

$v_k(i,j)(t)$ – швидкість k -го виду техніки у момент часу t , який належить часовому проміжку $[t_0(i,j); t_0(i,j) + t(i,j)]$;

$v^{(0)}$ – вершина графу, з якої розпочинається рух.

ВСТУП

На сьогоднішній день питання оптимізації перевезень є надзвичайно важливими в різних галузях діяльності людства, зокрема, при вирішенні різноманітних завдань логістичної сфери. Успішне здійснення багатьох перевезень суттєво залежить від своєчасності прибуття колони техніки у визначене місце призначення. Для ефективного перевезення різноманітних вантажів по суші використовується широке коло сучасних транспортних засобів з різними можливостями. Перед плануванням перевезень можливе проведення оптимізації складу колони техніки з урахуванням широкого кола факторів [13]. Однак, на наступному етапі необхідно вирішити задачу визначення оптимального маршруту руху колони техніки.

Наявна достатньо розгалужена мережа автомобільних доріг обумовлює значну кількість можливих маршрутів руху, які поєднують місце вибуття з пунк-

том призначення. Така багатоваріантність, звичайно, спостерігається навіть при незначних відстанях, які потрібно подолати.

На вибір оптимального маршруту суттєво може вплинути динаміка розвитку дорожньої обстановки. Внаслідок впливу прогнозованих і стохастичних факторів швидкість пересування колони по окремих ділянках маршруту може суттєво змінюватись. Недостатнє врахування зміни у часі дорожньої обстановки може призвести до неправильного вибору маршруту руху, який не забезпечить своєчасність прибуття колони у пункт призначення. Внаслідок такої затримки може відбутись зрив виконання визначених завдань. Тому задача вибору оптимального маршруту руху колони техніки з урахуванням динаміки зміни дорожньої обстановки є актуальною.

Об'єктом дослідження є вибір маршруту руху колони техніки.

Предметом дослідження є науково-методичний апарат оптимізації вибору маршрутів.

Метою роботи є розробка методики вибору оптимального маршруту руху колони техніки по нестационарній мережі доріг.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Колона техніки повинна вибути з пункту відправлення (точки А) та прибути в пункт призначення (точку В) за найкоротший час. Математична модель мережі доріг являє собою розмічений граф, що наведений на рис. 1, вага ребер якого відображає час руху колони вздовж них.

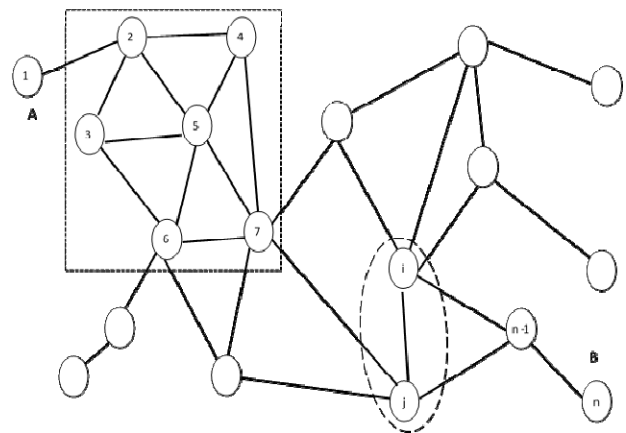


Рисунок 1 – Мережа автомобільних доріг між вихідним пунктом А та пунктом призначення В представлена графом

Необхідно знайти маршрут руху, при якому реалізується переміщення колони техніки з пункту А в пункт В за мінімальний проміжок часу.

Припустимо, що швидкість руху окремих одиниць техніки одного виду є сталою, а швидкість руху різних видів техніки у загальному випадку різна.

Вершини графа є вузлами розгалуження доріг. Вага ребра графа являє собою час руху колони між його вершинами. Швидкість колони визначається швидкіс-

тю виду транспортного засобу, яка має мінімальне значення для фіксованого проміжку часу. Останній є однією з складових загального часу руху колони вздовж ребра $\{i, j\}$.

Критерієм оптимальності маршруту є мінімізація часу руху по ньому. При цьому потрібно врахувати, що при русі колони час подолання окремих ділянок маршруту може бути змінним. Це обумовлено можливістю впливу на рух транспортних засобів різноманітних факторів, зокрема, погодно-кліматичних (сніг, туман, дощ, ожеледь, тощо), техногенних (завали, ремонт дорожнього полотна, його пошкодження внаслідок підтоплень ділянок дороги тощо), період доби (день, ніч) тощо.

У математичній моделі руху колони потрібно врахувати, що зміна ваг ребер може відбуватись:

1) дискретно, при досягненні колоною вершин графа з оновленням матриці ваг саме в ці моменти. У такому випадку рішення щодо наступного прокладання маршруту формується у вузлах графа з урахуванням дорожньої обстановки, яка динамічно змінюється і дані щодо якої надходять періодично. Цей випадок у подальшому називатимемо дискретно-стохастичним.

2) аналогічно попередньому випадку з наперед відомою зміною ваг ребер графа. При цьому, оптимальний маршрут руху може бути обраний на початку з урахуванням інформації про подальшу відому зміну стану доріг. Цей випадок у подальшому називатимемо дискретно-детермінованим;

3) неперервно при русі колони по мережі доріг. Цей випадок у подальшому називатимемо неперервно-невизначеним.

2 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Вирішення задач вибору маршрутів руху колон транспортних засобів для ефективного переміщення вантажів, а також суміжним задачам приділялась увага у ряді робіт, зокрема в роботах [1–14].

Підхід щодо вибору маршруту, який ґрунтується на *edgelabels*, наведений у праці [1]. Його застосування дозволяє прискорити пошук найкоротшого шляху в 500 разів у порівнянні зі стандартним алгоритмом Дейкстри над великим графом. У роботі [2] наведено алгоритм для вибору оптимальних маршрутів у мультимодальному режимі мережі громадського транспорту. За результатами цього дослідження підхід щодо маршрутизації транзитних вузлів був адаптований для планування переміщення громадським транспортом. У науковій праці [3] для пошуку найкоротшого шляху застосовано метод ієрархії контракції. У дослідженні [4] на основі застосування алгоритму SHARC наведено можливість з відшукування найкоротших шляхів для довільних засобів переміщення у транспортній мережі континентального масштабу. У науковій праці [5] досліджено проблему планування мультимодальних маршрутів. У роботі [6] наведено модель для оцінки трафіку затримки транспортних засобів з урахуванням довільних навантажень у процесі руху. У дослідженні

[7] наведено планування маршрутів для військових наземних транспортних засобів на полі бою. У роботі проведено моделювання невизначеностей, що мають місце на дорожній мережі, за допомогою набору дискретних сценаріїв. Запропоновано метод відшукування найкоротшого шляху для кожного окремого транспортного засобу. Результати розрахунків свідчать про те, що запропонований метод може забезпечити якісне рішення лише для мереж з невеликою кількістю вузлів. У науковій праці [8] розроблено алгоритм розв'язування задачі пошуку найкоротших за часом шляхів у міських маршрутних мережах транспорту загального користування з урахуванням тривалості пересадок методом віток і меж.

У джерелах [9–11] описуються можливості застосування геоінформаційних програмних продуктів ArcGIS для відшукування раціональних маршрутів руху. Маршрутний аналіз ArcGIS дозволяє здійснювати пошук найшвидшого за часом, найкоротшого за відстанню або навіть найбільш живописного маршруту з вихідної до кінцевої точки. До параметрів аналізу маршруту можуть входити час початку руху, час доби, точна дата, день тижня тощо. При виборі маршруту руху враховуються бар'єри – об'єкти, які обмежують, ускладнюють чи змінюють маршрут руху. За результатами обчислення з урахуванням вихідних параметрів та обмежень програмним продуктом формується певний маршрут руху.

У дослідженні [12] сформовано та досліджено варіант моделі планування вантажоперевезень, представлено прикладну програму для знаходження у транспортній мережі оптимального маршруту перевезення вантажів від одного постачальника до кількох споживачів.

У праці [13] задача вибору найкоротшого маршруту розв'язувалась за критерієм максимізації рівня готовності транспортних засобів та мінімізації марочного складу й кількості транспортних засобів у колоні. Обмеження моделі стосувалися забезпечення нормативно встановлених часу на перевезення та коефіцієнта готовності техніки, перевезення колоною особового складу заданої кількості та вантажу, заданої маси і об'єму, витрат різних видів пального, що не перевищують встановлених значень, не зниження запасу ходу по моторесурсу кожним транспортним засобом зі складу колони.

В авторській роботі [14] було здійснено формалізацію постановки задачі розміщення графа з неоднорідними ребрами та обґрунтовано метод її вирішення у двох різних випадках: у випадку, коли можливим є розбиття довільного ребра досліджуваного графа точками, що відповідають моментам часу, коли швидкість колони дискретно змінює своє значення, а також у випадку, коли розбиття ребра точками, що відповідають моментам часу, коли швидкість колони дискретно змінює своє значення, є проблемним, але при цьому швидкість колони у кожен фіксований момент часу є відомою.

З наведеного випливає, що у проаналізованих працях залишилися поза увагою наступні аспекти, які потребують урахування при виборі оптимального маршруту руху колони техніки:

– перевезення військових підрозділів вимагає дотримання вимог режимності, тому застосування загальнодоступного програмного забезпечення з великою ймовірністю може створювати передумови для прогнозування вибору маршруту руху ймовірним противником або порушником;

– перевезення потребує прогнозування зміни дорожньої обстановки з урахуванням комплексної статистичної інформації щодо проблемних ситуацій (аналіз ДТП на маршруті руху за минулий рік, інформації щодо проведення ремонтних робіт, врахування прогнозу погоди та ін.) на усьому маршруті руху з метою своєчасного виходу у визначений район;

– перевезення передбачають переміщення значної кількості людей і специфічних вантажів як на невеликі, так і на значні відстані;

– у зв'язку зі специфікою окремих завдань під час перевезення сумісно застосовується не тільки різномарочна, але і достатньо різнотипна техніка;

– виконання перевезень передбачає широке застосування будь-яких доріг, в тому числі ґрунтових, а іноді і бездоріжжя.

Отже, підходи та методи, які проаналізовані у наведених вище роботах, не можуть бути застосовні для розв'язування досліджуваної задачі безпосередньо. Разом з тим, запропонований у праці [14] метод є базовим і таким, що дозволяє впритул наблизитися до вирішення задачі вибору оптимального маршруту руху колони техніки. Особливість досліджуваної задачі полягає в нефіксованості ваг ребер, які описують окремі ділянки мережі доріг, у процесі руху колони.

Враховуючи це, метою даної роботи є розробка методики вибору оптимального маршруту руху колони техніки по нестационарній мережі доріг.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Зважаючи на те, що задача, яка адекватна реальному процесу, може мати місце у трьох постановках, необхідним є формування математичної моделі для кожної з них.

Розглянемо дискретно-стохастичний випадок. Нехай задано розмічений граф. Нехай v_i – деяка вершина графа. Необхідно знайти найкоротший шлях від заданої початкової вершини a до заданої вершини z , якщо величини $w_{ij}^{(i)}$ наперед невідомі і стають відомими лише в момент перебування у вершині v_i .

Інший можливий випадок – дискретно-детермінований, коли необхідно знайти найкоротший шлях від заданої початкової вершини a до заданої вершини z , якщо величини $w_{ij}^{(i)}$ наперед відомі.

Найбільш складним є неперервно-невизначений варіант завдання, у якому необхідно знайти найкоро-

тший шлях від заданої початкової вершини a до заданої вершини z , якщо величина шляху визначається часом руху вздовж нього.

Розглянемо можливі підходи до алгоритмізації методу розв'язування досліджуваної задачі.

З урахуванням фізичного змісту задачі можна стверджувати, що матриця ваг $W^{(i)} = (w_{ij}^{(i)})_{n \times n}$ може бути різною в залежності від часу, коли колона перебуває у вершині v_i . Тому природно, що матрицю ваг слід диференціювати в залежності від часу перебування колони у певній вершині.

Цей процес реалізуємо так. Початковий момент часу вважатимемо нульовим етапом.

Момент часу, коли колона перемістилася вздовж одного ребра і знаходиться у деякій вершині графа, вважатимемо першим етапом.

Момент часу, коли колона перемістилася вздовж двох ребер і знаходиться у деякій вершині графа, вважатимемо другим етапом і т.д.

З урахуванням цього, матрицю ваг у подальшому позначатимемо $W^{(i,k)} = (w_{ij}^{(i,k)})_{n \times n}$. Тут k визначає етап реалізації руху колони.

Для формування матриць ваг може бути застосований підхід, який описаний у роботі [14] і вибір складових якого залежить від початкових умов задачі, що проаналізовані у цій праці, та фізичного змісту досліджуваної задачі.

У випадку дискретно-стохастичної постановки задачі для її вирішення можна використати метод Дейкстри [10] пошуку найкоротшої відстані між заданими вершинами графа a і z .

Якою саме буде матриця ваг, залежатиме від того, з якої вершини розпочинається рух. Тобто, для досліджуваної задачі $a = v^{(0)}$.

Таким чином, застосування алгоритму Дейкстри дозволяє встановити оптимальний маршрут руху для етапу 0.

Однак цей маршрут не буде оптимальним в цілому для задачі, оскільки матриця ваг у момент перебування колони у наступній вершині після вершини $v^{(0)}$ зміниться.

З урахуванням цього, для етапу 1 відомою буде кінцева вершина графа, яка залишається незмінною, а також початкова вершина, яка визначатиметься з оптимального маршруту, отриманого для етапу 0, як його друга вершина ($v^{(1)}$).

З урахуванням того, що в момент перебування колони у першій вершині етапу 1, тобто в вершині $v^{(1)}$, матриця ваг зміниться (якою саме буде матриця ваг, залежатиме від того, з якої вершини розпочинається рух), задачу визначення оптимального маршруту можна далі розглядати як задачу пошуку найкоротшої відстані між вершинами $v^{(1)}$ і z .

Для її розв'язування знову можна скористатися алгоритмом Дейкстри, як і на попередньому етапі. За-

стосування цього алгоритму дозволяє встановити оптимальний маршрут руху для етапу 1.

Таким чином, для етапу 2 відомою буде не лише кінцева вершина графа, яка залишається незмінною (вершина z), а й початкова вершина, яка визначатиметься з оптимального маршруту, отриманого для етапу 1, як його друга вершина ($v^{(2)}$).

З урахуванням того, що в момент перебування колони у першій вершині етапу 2, тобто в вершині $v^{(2)}$, матриця ваг зміниться (якою саме буде матриця ваг, залежатиме від того, з якої вершини розпочинається рух), задачу визначення оптимального маршруту можна далі розглядати як задачу пошуку найкоротшої відстані між вершинами $v^{(2)}$ і z .

З наведеного можна зробити висновок, що метод розв'язування задачі для розглянутого випадку полягає в ітераційному застосуванні алгоритму Дейкстри із змінною першою вершиною та різними матрицями ваг на окремих етапах його застосування.

Якщо прийняти, що $z = v^{(g)}$, то ознакою зупинки запропонованого алгоритму є суміжність вершин $v^{(g-1)}$ і $v^{(g)}$ в оптимальному маршруті $(g-1)$ -го етапу.

Наглядне представлення наведеного алгоритму можна оцінити з табл. 1.

Таблиця 1 - Етапи реалізації ітераційного застосування алгоритму Дейкстри із змінною першою вершиною та різними матрицями ваг на окремих етапах його застосування

Етап	Вершини оптимального маршруту руху в залежності від етапу					
	a					z
0	$v^{(0)}$	$v^{(1)}$				
1		$v^{(1)}$	$v^{(2)}$			
2			$v^{(2)}$	$v^{(3)}$		
...					...	
$g-1$					$v^{(g-1)}$	$v^{(g)}$

Таким чином, оптимальний маршрут руху колони у випадку 1 являтиме собою наступну послідовність вершин: $a = v^{(0)}$, $v^{(1)}$, $v^{(2)}$, ..., $v^{(g-1)}$, $v^{(g)} = z$.

А отже, оптимальна тривалість руху колони у досліджуваному випадку становить $T = \sum_{i=0}^{g-1} w_{v^{(i)}, v^{(i+1)}}^{(v^{(i)}, i)}$, де $w_{v^{(i)}, v^{(i+1)}}^{(v^{(i)}, i)}$ – вага ребра між вершинами $v^{(i)}$ і $v^{(i+1)}$ матриці ваг $W^{(v^{(i)}, i)}$.

Для дискретно-детермінованого варіанту можливо використати інший підхід. Наведена математична модель досліджуваної задачі у цьому випадку дозволяє зробити висновок, що для її розв'язування можна скористатися методом, алгоритм якого полягає у побудові

© Боровик О. В., Рачок Р. В., Боровик Л. В., Купельський В. В., 2019
 DOI 10.15588/1607-3274-2019-4-11

ві на початковому етапі усіх можливих шляхів між заданими вершинами графа a і z , встановленні сукупностей матриць ваг для кожного знайденого шляху, що відповідають кожній вершині на відповідному етапі, подальшому визначенні тривалості реалізації кожного шляху та вибору найкоротшого з шляхів на основі порівняння знайдених тривалостей. Слід звернути увагу на те, що при побудові альтернативних варіантів можливих шляхів між вершинами графа можливо уникнути розгляду тих з них, які містять повтори вершин, у яких колони вже побувала.

Тривалості реалізації альтернативних шляхів між вершинами графа a і z будуть рівні

$$T^{(1)} = w_{1,2}^{(1,0)} + w_{2,4}^{(2,1)} + w_{4,z}^{(4,2)},$$

$$T^{(2)} = w_{1,3}^{(1,0)} + w_{3,4}^{(3,1)} + w_{4,6}^{(4,2)} + w_{6,z}^{(6,3)},$$

$$T^{(3)} = w_{1,2}^{(1,0)} + w_{2,3}^{(2,1)} + w_{3,5}^{(3,2)} + w_{5,7}^{(5,3)} + w_{7,6}^{(7,4)} + w_{6,z}^{(6,5)}.$$

З урахуванням цього, мінімальний час руху колони між заданими вершинами графа a і z рівний

$$T = \min\{T^{(1)}; T^{(2)}; T^{(3)}; \dots\}.$$

Тоді, якщо $T = T^{(i)}$, то i -й маршрут є оптимальним.

Третій випадок постановки завдання – неперервно-невизначений. Наведена математична модель досліджуваної задачі при цьому дозволяє зробити висновок, що для її розв'язування можна скористатися методами, запропонованими для випадків 1 або 2 з урахуванням підходу до розмічення графа, що наведений нижче. Розглянемо ребро графа (рис. 2).

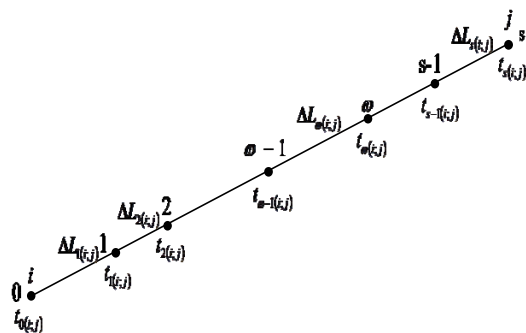


Рисунок 2 – Ребро графа, що представляє мережу автомобільних доріг

Розіб'ємо ребро $\{i; j\}$ точками $0, 1, 2, \dots, \omega-1, \omega, \dots, s-1, s$, що відповідають моментам часу, коли швидкість колони дискретно змінює своє значення. При цьому точка 0 співпадає з кінцем i , а точка s з кінцем j ребра $\{i; j\}$.

Ділянки $\Delta L_{\omega(i,j)}$ відповідають такі швидкості усіх видів техніки колони: $v_1[t_{\omega-1(i,j)}; t_{\omega(i,j)}]$, $v_2[t_{\omega-1(i,j)}; t_{\omega(i,j)}]$, ..., $v_k[t_{\omega-1(i,j)}; t_{\omega(i,j)}]$, ..., $v_l[t_{\omega-1(i,j)}; t_{\omega(i,j)}]$.

Тоді, з урахуванням того, що швидкість колони визначається швидкістю того виду транспортного засобу, який має мінімальне значення для фіксованого

проміжку часу, швидкість колоні на ділянці $\Delta L_{\omega(i,j)}$

визначатиметься за формулою

$$\bar{v}_{\omega} [t_{\omega-1(i,j)}; t_{\omega(i,j)}] = \min \left\{ v_1 [t_{\omega-1(i,j)}; t_{\omega(i,j)}], v_2 [t_{\omega-1(i,j)}; t_{\omega(i,j)}], \dots, v_k [t_{\omega-1(i,j)}; t_{\omega(i,j)}], \dots, v_l [t_{\omega-1(i,j)}; t_{\omega(i,j)}] \right\} \quad (1)$$

Слід зауважити, що в загальному випадку для ділянки $\Delta L_{\omega(i,j)}$ величина $\bar{v}_{\omega} [t_{\omega-1(i,j)}; t_{\omega(i,j)}]$ є сталою для всіх видів техніки, що рухаються в складі колоні.

Наведене дозволяє зробити висновок, що час руху колоні на ділянці $\Delta L_{\omega(i,j)}$ буде рівним

$$\bar{t}_{\omega(i,j)} = \frac{\Delta L_{\omega(i,j)}}{\bar{v}_{\omega} [t_{\omega-1(i,j)}; t_{\omega(i,j)}]} \quad (2)$$

При цьому, формулою (2) можна користуватися

при довільному $\omega = \overline{1, s}$.

А отже, вага ребра $\{i, j\}$ може бути знайдена за формулою

$$t(i, j) = \sum_{\omega=1}^s \bar{t}_{\omega(i,j)} \quad (3)$$

Описаний підхід дозволяє підійти до розв'язування задачі розміщення графа і у випадку, коли розбиття ребра $\{i, j\}$ точками $0, 1, 2, \dots, \omega-1, \omega, \dots, s-1, s$, що відповідають моментам часу, коли швидкість колоні дискретно змінює своє значення, є проблемним, але при цьому швидкість колоні у кожен фіксований момент часу є відомою.

Розв'язування задачі при цьому виглядає так. З урахуванням того, що швидкість колоні визначається швидкістю того виду транспортного засобу, який має мінімальне значення для фіксованого моменту часу $t \in [t_0(i,j); t_0(i,j) + t(i,j)]$, швидкість колоні у момент t буде рівна

$$v_{(i,j)}(t) = \min \{ v_1(i,j)(t), v_k(i,j)(t), v_l(i,j)(t) \} \quad (4)$$

А отже, справедливою буде формула

$$\int_{t_0(i,j)}^{t_0(i,j)+t(i,j)} v_{(i,j)}(t) dt = \Delta L_{(i,j)} \quad (5)$$

Застосування формули Ньютона-Лейбніца до лівої частини формули (5) дозволяє отримати, що

$$f_{(i,j)}(t) \Big|_{t_0(i,j)}^{t_0(i,j)+t(i,j)} = \Delta L_{(i,j)} \quad (6)$$

Здійснивши серію перетворень, з (6) можна отримати

$$\begin{aligned} f_{(i,j)}(t_0(i,j) + t(i,j)) - f_{(i,j)}(t_0(i,j)) &= \Delta L_{(i,j)}, \\ f_{(i,j)}(t_0(i,j) + t(i,j)) &= f_{(i,j)}(t_0(i,j)) + \Delta L_{(i,j)}, \\ t_0(i,j) + t(i,j) &= f_{(i,j)}^{-1}(f_{(i,j)}(t_0(i,j)) + \Delta L_{(i,j)}) \end{aligned}$$

А отже, шукана вага ребра $\{i, j\}$ буде рівна

$$t(i, j) = f_{(i,j)}^{-1}(f_{(i,j)}(t_0(i,j)) + \Delta L_{(i,j)}) - t_0(i, j) \quad (7)$$

Використовуючи аналогічні підходи, можна знайти вагу кожного ребра графа, що описує транспортну мережу, як у випадку можливості розбиття ребер графа на окремі фрагменти, так і в протилежному випадку.

Застосування одного з методів, що запропоновані для дискретно-стохастичного і дискретно-детермінованого випадків, залежить від того, відомими чи невідомими є моменти перебування колоні у вершинах графа.

У разі, якщо завчасно відомі можливі моменти перебування колоні у кожній вершині графа, то застосовуючи описаний вище підхід, можна завчасно встановити матриці ваг графа, сформувавши їх до початку руху колоні. А отже, в цьому випадку для відшукування оптимального шляху руху колоні можна скористатися методом, що запропонований у даній роботі для дискретно-детермінованого випадку.

Якщо ж можливі моменти перебування колоні у кожній вершині графа завчасно невідомі, то застосування наведеного вище способу розміщення графа можливе на етапі перебування колоні у певній вершині. А отже, в цьому випадку для відшукування оптимального шляху руху колоні можна скористатися методом, що запропонований у даній роботі для дискретно-стохастичного випадку.

Таким чином, метод розв'язування досліджуваної задачі у третьому випадку полягає в комплексуванні алгоритмів розміщення графа та безпосередньо визначення оптимального шляху в залежності від часу формування матриці ваг графа.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Розглянемо приклад використання запропонованої методики для оптимізації побудови маршруту руху колоні техніки по мережі доріг, яка зображена на рис. 3.

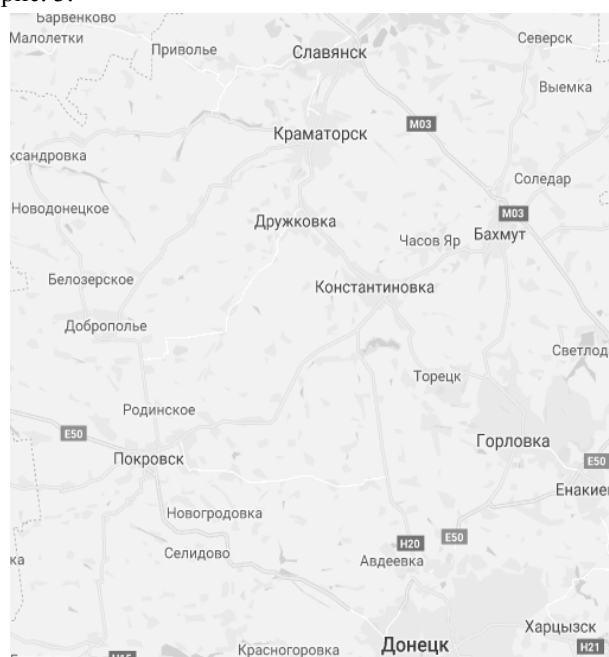


Рисунок 3 – Досліджувана ділянка місцевості

Мережі доріг цієї ділянки відповідає граф, що відображений на рис. 4, ваги ребер якого обчислені з використанням описаного вище підходу.

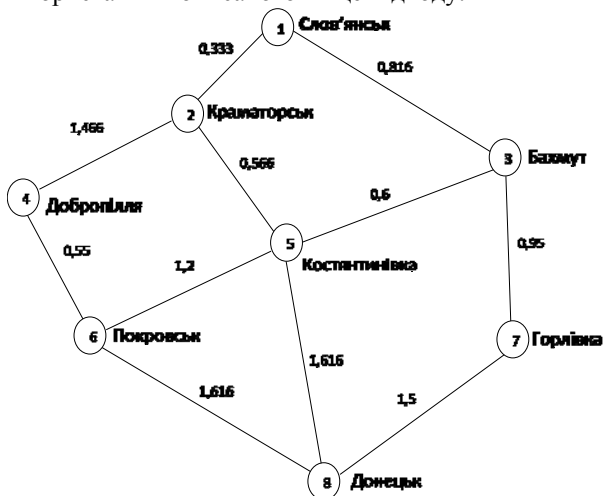


Рисунок 4 – Граф мережі доріг

З метою алгоритмічно-програмної реалізації описаного вище методик було розроблене програмне забезпечення, що відображене на рис. 5.

З метою проведення досліджень у програмі реалізовані наступні методики пошуку маршрутів: на основі класичного алгоритму Дейкстри без урахування динаміки зміни дорожньої обстановки (розрахунок 1); покрокове застосування алгоритму Дейкстри з коригуванням матриці ваг на кожному кроці побудови маршруту (розрахунок 2); повний перебір усіх можливих маршрутів, що поєднують пункт вибуття з пунктом призначення без повернень (розрахунок 3) і з поверненнями та обмеженою глибиною пошуку (розрахунок 4).

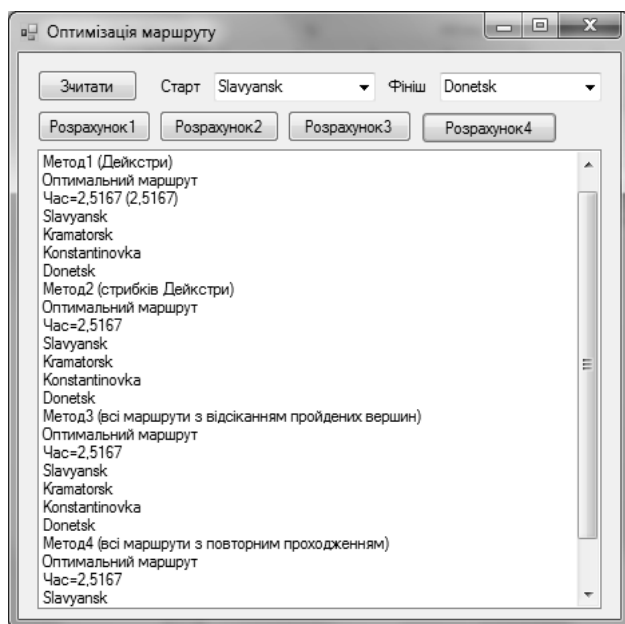


Рисунок 5 – Головне вікно програми визначення оптимального маршруту руху колони

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Для випадку, коли розглядається стала дорожня обстановка, всі реалізовані у програмному забезпеченні методики очікувано забезпечують отримання однакового оптимального маршруту руху (Слов'янськ, Краматорськ, Константинівка, Донецьк) з однаковим значенням показника ефективності – часу на подолання маршруту 2,5167 (рисунок 5).

Однак, припустимо, що через деякий час (на третьому кроці) відбудеться тривале погіршення дорожньої обстановки на ділянці Константинівка-Донецьк (значне пошкодження дорожнього покриття). Внаслідок цього вага відповідного ребра зміниться з 1,616 до 10,6.

У цьому випадку, застосування алгоритму Дейкстри, що не враховує зміну матриці ваг ребер, приведе до отримання маршруту, який є оптимальним лише для початкового стану ваг ребер графу. При урахуванні зміни стану дорожнього покриття показник ефективності для такого маршруту суттєво погіршиться (рис. 6).

При послідовному використанні алгоритму Дейкстри зі зміною матриці ваг ребер на кожному етапі ситуація суттєво покращується.

З використанням даної методики отримується інший маршрут, який за показником ефективності є кращим практично в три рази.

Найкраще і, очевидно, оптимальне рішення забезпечує третя і четверта методика, які приводять до отримання однакових результатів. При цьому показник ефективності у порівнянні з класичним алгоритмом Дейкстри зростає в понад 3,5 рази.

Розглянемо ще один випадок динамічної зміни дорожньої обстановки з короткотривалою перешкодою (рис. 7).

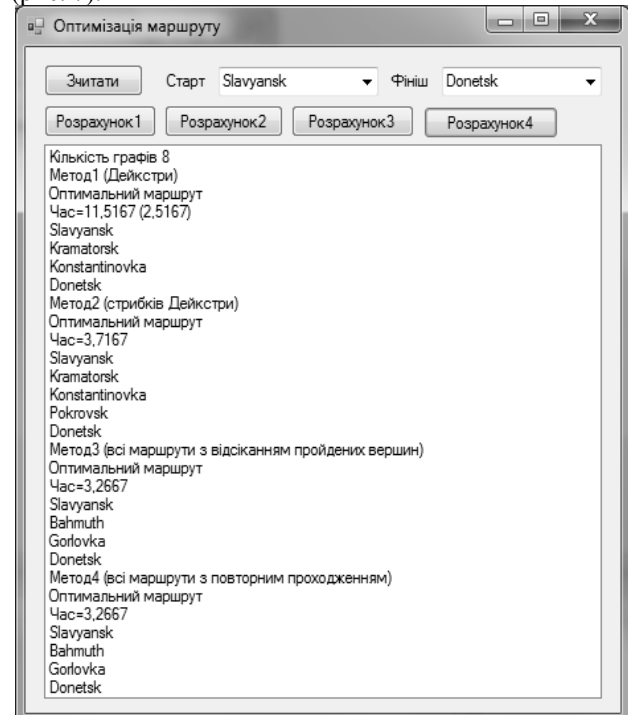


Рисунок 6 – Результати пошуку оптимального маршруту при тривалій зміні дорожньої обстановки

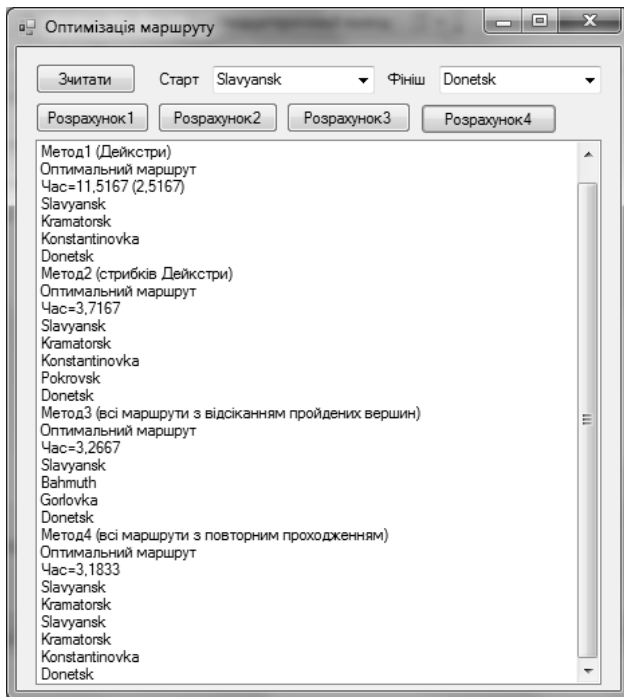


Рисунок 7 – Результати пошуку оптимального маршруту при короткотривалій зміні дорожньої обстановки

Внаслідок появи короткотривалої перешкоди дорожньому руху лише на 3 етапі вага ребра, яке пов'язує Константиновку з Донецьком, зміниться з 1,616 до 10,6, але вже на наступному кроці відновить своє попереднє значення і залишатиметься в подальшому 1,616.

У цьому випадку результати використання перших трьох методик збігаються з попереднім випадком тривалої зміни дорожньої обстановки. Однак, ці маршрути виявляються неоптимальними, оскільки з урахуванням можливості повернення у попередні вузли наявний маршрут, який додатково забезпечує покращення показника ефективності на понад 2,5%.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Запропонована у даному дослідженні методика дозволяє враховувати динаміку зміни дорожньої обстановки при плануванні оптимальних маршрутів колон техніки.

Проте, хоча при визначенні ваг ребер графа, що описує мережу доріг, і розглянутий неперервний в часі випадок, при пошуку оптимального маршруту досліджується лише варіант дискретної його побудови зі стрибкоподібними змінами матриці ваг у вузлах графу.

Потребує окремих досліджень також і питання прогнозування зміни дорожньої обстановки з урахуванням як детермінованих, так і стохастичних факторів (планових і позапланових ремонтних робіт, планових обмежень руху, ймовірнісної оцінки аварійності окремих ділянок доріг тощо).

Для прогнозування зміни дорожньої обстановки доцільно розглянути можливість використання методів штучного інтелекту, зокрема, нейронних мереж.

ВИСНОВКИ

Таким чином, у роботі поставлена задача вибору оптимального маршруту руху колони техніки з урахуванням динаміки зміни дорожньої обстановки та інших факторів; сформовано математичні моделі досліджуваної задачі для дискретно-стохастичного, дискретно-детермінованого та неперервно-невизначеного випадків. У відповідності з цими моделями запропоновано методику вибору оптимального маршруту руху колони техніки. У дослідженні розглянуто приклад використання цієї методики для фрагменту мережі доріг та показано суттєвий вплив динамічної зміни обстановки на ефективність маршруту. Урахування зміни в часі ваг ребер графу, що відображає мережу доріг, дозволяє уникати неоптимальних розв'язків задачі.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у формалізації задачі пошуку оптимального маршруту руху колони техніки з урахуванням динаміки зміни дорожньої обстановки, побудові відповідних математичних моделей та методики її розв'язання. Результати обчислювальних експериментів підтвердили важливість урахування зміни ваг ребер графа в ході реалізації визначеного маршруту. Запропонований науково-методичний апарат розширює науковий інструментарій теорії дискретної оптимізації.

Практичне значення отриманих результатів полягає в підвищенні ефективності застосування підрозділів швидкого реагування за рахунок оптимізації маршрутів їх переміщення. Програмно-алгоритмічна реалізація запропонованої методики дозволяє розширити функціональні можливості відповідних програмно-технічних комплексів.

Перспективи подальших досліджень полягають у дослідженні неперервного випадку зміни ваг ребер графу мережі доріг та пошуку методики вирішення оптимізаційного завдання у цьому випадку. Також, перспективним є прогнозування зміни дорожньої обстановки з урахуванням факторів як детермінованої, так і стохастичної природи.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках спільних наукових досліджень кафедри транспортних засобів і спеціальної техніки й кафедри загальнонаукових та інженерних дисциплін Національної академії Державної прикордонної служби України.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Fast point-to-point shortest path computations with arc-flags / [M. Hilger, E. Kohler, R. H. Mohring, H. Schilling] // The Shortest Path Problem. – Rhode Island: American Society, 2009. – (DIMACS). – (Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science; Vol. 74). – P. 41–72.
2. Antsfeld L. Finding Multi-criteria Optimal Paths in Multi-modal Public Transportation Networks using the Transit Algorithm /

- L. Antsfeld, T. Walsh // Artificial Intelligence and Logistics AILog 2012 Workshop Proceedings. – 2012. – №1. – P. 7–11.
3. Contraction Hierarchies: Faster and Simpler Hierarchical Routing in Road Networks / [R. Geisberger, P. Sanders, D. Schultes et al.] // Experimental Algorithms. – Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. – (Springer-Verlag Berlin Heidelberg). – (Theoretical informatics and general questions; vol. 5038). – P. 319–333.
4. Delling D. Time-dependent SHARC-routing / Daniel Delling // Algorithmica. – Cham: Springer International Publishing AG, 2011. – (Springer-Verlag). – (Special Issue: European Symposium on Algorithms; Vol. 60). – P. 60–94.
5. Route Planning in Transportation Networks / [H. Bast, D. Delling, A. Goldberg et al.] // Algorithm Engineering. – Cham: Springer International Publishing AG, 2016. – (Springer Nature). – (Theoretical informatics and general questions; Vol. 9220). – P. 19–80.
6. Resilience and efficiency in transportation networks / [A. A. Ganin, M. Kitsak, D. Marchese et al.]. // Science Advances. – 2017. – №3. – P. 1–8.
7. Route Planning for Military Ground Vehicles in Road Networks under Uncertain Battlefield Environment / [T. Zhao, J. Huang, J. Shi et al.]. // Journal of Advanced Transportation Received. – 2018. – №1. – pp. 1–10.
8. Кузькін О. Ф. Пошук шляхів у маршрутних мережах міст методом відгалужень і меж / О. Ф. Кузькін // Комунальне господарство міст. – 2012. – № 103. – С. 378–388.
9. Лейс Т. Г. ArcGIS. ArcMap. Руководство пользователя / Т. Г. Лейс. – М. : МГУ, 2005. – 558 с.
10. Crosier S. ArcGIS 9: Getting started with ArcGIS / Scott Crosier. – Redlands, Calif.: ESRI, 2004. – 256 с. – (ESRI).
11. ArcGIS 9 ArcMap Руководство пользователя [Електронний ресурс] // ESRI. – 2004. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.rulit.me/books/arcgis-9-arcmap-rukovodstvo-polzovatelya>.
12. Матвейчук Т. А. Модування та програмна реалізація процесу планування вантажоперевезень у військовій логістиці / Т. А. Матвейчук // Військово-технічний збірник АСВУ. – 2016. – № 14. – С. 18–25.
13. Математична модель задачі формування складу транспортної колони прикордонної комендатури швидкого реагування та її програмно-алгоритмічна реалізація / О. В. Боровик, Л. В. Рачок, Л. В. Боровик, В. В. Купельський. // Збірник наукових праць ВІКНУ. – 2017. – № 55. – С. 17–30.
14. Боровик О. В. Розмічення графа мережі доріг при розв'язуванні задачі вибору оптимального маршруту руху колони техніки прикордонної комендатури швидкого реагування / О. В. Боровик, В. В. Купельський. // Збірник наукових праць НАДПСУ. – 2018. – № 76. – С. 244–255.
Стаття надійшла до редакції 03.06.2019.
Після доробки 09.10.2019.

УДК 528.29

МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА ДВИЖЕНИЯ КОЛОННЫ ТЕХНИКИ ПО НЕСТАЦИОНАРНОЙ СЕТИ ДОРОГ

Боровик О. В. – д-р техн. наук, профессор, заместитель ректора по учебной работе, Национальная академия Государственной пограничной службы Украины имени Богдана Хмельницкого, Хмельницкий, Украина.

Рачок Р. В. – д-р техн. наук, доцент, начальник кафедры общенаучных и инженерных дисциплин, Национальная академия Государственной пограничной службы Украины имени Богдана Хмельницкого, Хмельницкий, Украина.

Боровик Л. В. – д-р пед. наук, доцент, профессор кафедры общенаучных и инженерных дисциплин, Национальная академия Государственной пограничной службы Украины имени Богдана Хмельницкого, Хмельницкий, Украина.

Купельский В. В. – адъюнкт, Национальная академия Государственной пограничной службы Украины имени Богдана Хмельницкого, Хмельницкий, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Эффективное решение значительного числа прикладных задач, касающихся перемещений, в ряде случаев зависит от удачного выбора маршрута движения. Построение оптимальных маршрутов на размеченном графе, который описывает сеть дорог и имеет постоянные веса ребер, является классической и подробно изученной задачей. Однако во многих приложениях возникает необходимость учета возможной динамики изменения во времени весов ребер, что соответствует случаям изменения дорожных условий. Последнее требует развития соответствующего научно-методического аппарата.

Цель. Целью работы является разработка методики выбора оптимального маршрута движения колонны техники по нестационарной сети дорог в понимании переменности веса ребер графа, соответствующего этой сети.

Метод. В работе предложена математическая модель выбора оптимального маршрута движения колонны техники по сети дорог. Для описания сети дорог использован граф. Критерием оптимальности при выборе маршрута движения является минимизация времени, затрачиваемого на передвижение. Особенностью модели является учет возможности динамического изменения весов ребер графа при реализации передвижения колонны техники по выбранному маршруту. На основе использования данной модели предложена методика, которая обеспечивает выбор оптимальных маршрутов движения для дискретно-стохастического, дискретно-детерминированного и непрерывно-неопределенного случаев изменения весов ребер графа.

Результаты. В статье предложены алгоритмы, обеспечивающие решение задачи выбора оптимального маршрута в условиях нефиксированного во времени веса ребер, которые описывают сеть дорог, а также проанализированы особенности применения алгоритмов. С использованием разработанного программного обеспечения исследован вариант сети дорог с нестационарным весом ребер. На примере показано несовершенство решений относительно оптимального маршрута при нестационарном весе ребер графа, полученных с использованием классических методов.

Выводы. Отсутствие учета возможного изменения дорожной обстановки, которое проявляется изменением во времени весов ребер графа, описывающего сеть дорог, может привести к неоптимальности получаемых решений с использованием классических методов поиска кратчайшего маршрута в графе. Для получения оптимальных маршрутов с учетом изменения во времени дорожной обстановки при движении колонны, возможно использовать предложенную в данном исследовании методику. Полученные результаты расширяют возможности по решению задач в области дискретной оптимизации с учетом динамики изменения обстановки при реализации оптимальных решений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оптимизация маршрута, граф, метод Дейкстры.

© Боровик О. В., Рачок Р. В., Боровик Л. В., Купельский В. В., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-4-11

THE METHOD OF SELECTION OF THE OPTIMAL ROUTE OF MOVEMENT OF COLUMNS OF VEHICLES UNDER NON-STATIONARY ROAD NETWORK

Borovyk O. V. – Dr. Sc., Deputy Rector of the Academy of Educational Work, the National Academy of State Border Guard Service of Ukraine Named After Bohdan Khmelnytsky, Khmelnytsky, Ukraine.

Rachok R. V. – Dr. Sc., Associate Professor, Chief of the Department of General Scientific and Engineering Disciplines, the National Academy of State Border Guard Service of Ukraine Named After Bohdan Khmelnytsky, Khmelnytsky, Ukraine.

Borovyk L. V. – Dr. Sc., Associate Professor, Professor of the Department of General Scientific and Engineering Disciplines, the National Academy of State Border Guard Service of Ukraine Named After Bohdan Khmelnytsky, Khmelnytsky, Ukraine.

Kupelsky V. V. – Adjunct, the National Academy of State Border Guard Service of Ukraine Named After Bohdan Khmelnytsky, Khmelnytsky, Ukraine.

ABSTRACT

Context. Effective solution of a large number of applications requires optimal transportation. Construction of optimal routes on a static in time graph describing a network of roads is a classic and detailed study of tasks. However, in many applications, there is a need to take into account the possible dynamics of the change in time of road conditions, which requires the development of the appropriate scientific and methodical apparatus.

Objective. The purpose of the work is to develop a methodology for choosing the optimal route of movement of the equipment column on a non-stationary road network.

Method. In the paper a mathematical model of the choice of the optimal route of the movement of the vehicles column along the network is proposed. A graph is used to describe the network of roads. The criterion of optimality when choosing a route is to minimize the time spent on travel. The peculiarity of the model is to take into account the possibility of dynamically changing the weight of the edges of the graph when moving the column of technology on the chosen route. Based on the use of this model, a technique is proposed which ensures the selection of optimal route for discrete-stochastic, discrete-deterministic and continuously-indefinite cases of changes in the weight of the edges of the graph.

Results. In the article the algorithms are chosen and the features of their application are shown, which provide solution of the problem of choosing the optimal route in the conditions of the ribs that are not fixed in time, which describe the network of roads. The description of the algorithmic and programmatic implementation of the proposed methodology is given. With the use of developed software, the research model of the road network with a non-stationary weight of the ribs. The example shows the imperfection of the solutions for optimal route under the non-stationary weight of the edges of the graph obtained using classical methods.

Conclusions. Failure to take into account the possible change in the road situation, which manifests itself in the change in the time scale of the edges of the graph, which describes the network of roads, may lead to the non-optimality of the solutions obtained using the classic methods of finding the shortest route in the graph. To get the best routes, taking into account the change in the time of the road situation during the movement of the column, it is possible to use the method proposed in this study. The obtained results extend the possibilities for solving the problems in the field of discrete optimization taking into account the dynamics of the changing situation in the implementation of optimal solutions.

KEYWORDS: Route Optimization, Graph, Dijkstra's Method.

REFERENCES

1. Hilger M., Kohler E., Mohring R. and Schilling H., Fast point-to-point shortest path computations with arc-flags, *DIMACS*, 2009, Vol. 74, pp. 41–72.
2. Antsfeld L. and Walsh T. Finding Multi-criteria Optimal Paths in Multi-modal Public Transportation Networks using the Transit Algorithm, *Artificial Intelligence and Logistics AILog 2012 Workshop Proceedings*, 2012, No. 1, pp. 7–11.
3. Geisberger R., Sanders P., Schultes D. and Delling D., Contraction Hierarchies: Faster and Simpler Hierarchical Routing in Road Networks. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, Vol. 5038, pp. 319–333.
4. Delling D. Time-dependent SHARC-routing, Springer International Publishing AG, 2008, Vol. 60, pp. 60–94.
5. Bast H., Delling D., Goldberg A., Müller-Hannemann M., Pajor T., Sanders P., Wagner D. and Werneck R. F. Route Planning in Transportation Networks, Springer International Publishing AG, 2016, Vol. 9220, pp. 19–80.
6. Ganin A. A., Kitsak M., Marchese D., Keisler J. M., Seager T. and Linkov I. Resilience and efficiency in transportation networks, *Science Advances*, 2017, No. 3, pp. 1–8.
7. Zhao T., Huang J., Shi J. and Chen C. Route Planning for Military Ground Vehicles in Road Networks under Uncertain Battlefield Environment, *Journal of Advanced Transportation Received*, 2018, No. 1, pp. 1–10.
8. Kuz'kin O. F. Poshuk shlyakhiv u marshrutnykh merezhakh mist metodom vidhaluzhen' i mezh, *Communal economy of cities*, 2012, No. 103, pp. 378–388.
9. Leys T. G., ArcGIS. ArcMap. Rukovodstvo pol'zovatelya. Moscow, MSU, 2005, 558 p.
10. Crosier S. ArcGIS 9: Getting started with ArcGIS, Redlands, Calif., 2005, 256 p.
11. ArcGIS 9 ArcMap Rukovodstvo pol'zovatelya, Access mode to the resource: <https://www.rulit.me/books/arcgis-9-arcmap-rukovodstvo-polzovatelya>.
12. Matveychuk T. A. Modelyuvannya ta prohramna realizatsiya protsesu planuvannya vantazhoperevezen' u viys'koviy lohistytsi, *Military-technical collection*, 2016, No. 14, pp. 18–25.
13. Borovik, O.V., Rachok, R.V., Borovik, L.V. and Kupelskiy V. V. The mathematical model of the problem of formation of the convoy of frontier commandant rapid response and its software-algorithmic implementation, *Military-technical collection*, 2017, No. 55, pp. 17–30.
14. Borovik O. V. and Kupelskiy V. V., Rozmichennya hrafa merezhi dorih pry rozv'yazuvanni zadachi vyboru optymal'noho marshrutu rukhu kolony tekhniky prykordonnoyi komendatury shvydkoho reahuvannya, *Military-technical collection*, 2018, No. 76, pp. 244–255.