

Розділ 3

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА ЕФЕКТИВНЕ МАШИНОВИКОРИСТАННЯ В АГРОІНЖЕНЕРІЇ

УДК 656.135

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ДИНАМІЧНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ З ЧАСОВИМИ ВІКНАМИ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ПРОДУКЦІЇ

Мирослав Оліскевич¹, д. т. н., Олександр Мاستикаш², Ярослав Ценюх³

¹Львівський національний аграрний університет,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: oliskevychm@gmail.com

²Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. С. Бандери, 13, м. Львів, Україна,
e-mail: o.mastykash@gmail.com

³Львівська філія УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого,
вул. Л. Мартовича, 15, смт Магерів, Жовківський р-н,
Львівська обл., Україна,
e-mail: lfilia@ukr.net

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2021.25.072>

Оліскевич М., Мاستикаш О., Ценюх Я. Удосконалення методу динамічної маршрутизації з часовими вікнами автомобільних перевезень сільськогосподарської продукції

Стаття присвячена вдосконаленню методу динамічної маршрутизації автомобільних перевезень транспортних засобів. Розглядається дрібногуртова доставка на кільцевих маршрутах магістральної транспортної мережі вантажів, які швидко псуються. Головним критерієм якості перевезення обрано мінімальну гарантовану тривалість доставки вантажів з усієї сукупності замовлень на перевезення. Обмеження стосуються горизонту прогнозування, а також часових вікон на доставку вантажів. Іншим обмеженням є інтенсивність використання автомобільних транспортних засобів. Поставлено вимогу залучення мінімальної кількості автомобільних транспортних засобів із наявних. Зроблено огляд та аналіз відомих методів динамічної маршрутизації, який показав, що при зростанні кількості замовлень, особливо незапланованих, вони стають неефективними за якістю результатів. З'ясовано, що застосування попередньої класифікації є способом, який покращує результат маршрутизації. У цій роботі як класифікаційну ознаку використано сумісність окремих операцій транспортного процесу, які виконуються послідовно, в єдиному потоці. Кожна з таких операцій стосується доставки дрібногуртових вантажів за одним замовленням. Попередня класифікація замовлень на перевезення дає змогу сформувати з них оптимальні кільцеві розвізні або збірні маршрути. Крім того, для планування доставки на кільцевих маршрутах вантажів, які швидко псуються, було вперше застосовано складання розкладу виконання транспортних операцій. Для цього розглядалися часові зв'язки, які виникають між кожною парою заданих замовлень на перевезення. На основі вивчених зв'язків побудовано модель у вигляді орієнтованого графа. Впорядкування такого графа дає змогу розробити активний, найменш тривалий розклад виконання транспортного процесу. Такий метод дає змогу застосувати лінійне програмування при пошуку оптимального розкладу та метод гілок і меж при маршрутизації. Динамічні зміни дорожніх і транспортних умов не погіршують якості попередньо виконаної маршрутизації. Було виконано апробацію методики на тестових входних даних. Порівняння результатів, отриманих за запропонованим методом і відомим методом границь і меж, показало покращання щонайменше на 11 % показників якості розроблених маршрутів і розкладів.

Ключові слова: автомобільні вантажні перевезення, динамічна маршрутизація, сумісність замовлень.

Oliskevich M., Mastykash O., Tsenyukh Ya. Improvement of the method of dynamic routing with time windows of motor tracking of agricultural products

The article is devoted to improvement of the method of dynamic routing of motor vehicles. Peculiarities of transportation of agricultural goods are considered. There is a high probability of improper transportation of perishable goods up to refusals to provide such services and loss of cargo and damage. More specifically, the problem of vehicle routing concerns the

design of multiple road routes, the implementation of which is characterized by minimum costs incurred in meeting the demand for agricultural products of a group of geographically dispersed consumers, satisfying a group of operational constraints.

An overview of known publications related to the dynamic routing methods has been made. Three main factors of the need for dynamic tasks are taken into account. As the impact of these factors becomes stronger, development of online transport management methods is becoming more relevant. In addition, the analysis of known methods of routing and scheduling of vehicles showed that with the increase in the number of orders, especially unplanned, that methods became inefficient in the quality of results. Application of pre-classification is a way to improve the result.

The problem of dynamic routing is formulated as follows. There are many known orders for transportation of perishable goods. Orders must be completed as soon as possible. Delivery of these goods from agricultural producers to procurement enterprises is of small scale. The volume and type of cargo and starting or ending points of routes for each of the orders are set. Time windows of orders are formed under the influence of acceptable terms of harvesting and processing of agricultural products, on one hand, and consumer demand, on the other hand. The limits of the time window are the earliest point in time before which the order cannot be executed and the latest point in time after which the order must be executed. The content of the order is that the transport company must load the cargoes into the trucks within the time specified by the agricultural producer and deliver them to customers just in time. The main criterion for the quality of transportation is the minimum guaranteed duration of delivery of goods from the entire set of orders for transportation. Restrictions are applied to the forecast horizon, as well as time windows for cargo delivery. Another limitation is the intensity of the vehicle fleet use. The requirement of the minimum number of involved trucks from available is set. The proposed method of compiling dynamic schedules and routes differs from the known ones. The sets of input data in this method (transport orders) are first pre-classified according to the compatibility of processing in a single transport process. Then the schedule and route can be made using linear programming methods that provide a guaranteed accurate solution. In addition, the results of optimization of routes and timetables of trucks by the proposed method are stable and resistant to changes in transport and road conditions. Tests of the method on the test model showed that the method of branches and boundaries with a preliminary classification shows approximately 11 % less guaranteed delivery time of all goods. At the same time, the use of trucks also increases by 11 % and their unproductive mileage is reduced.

Key words: road freight transportation, dynamic routing, order compatibility.

Постановка проблеми. Автомобільні перевезення сільськогосподарської продукції відрізняються декількома особливостями: сезонною нерівномірністю вантажопотоків; стислими термінами виконання робіт (вузькими часовими вікнами); великим географічним масштабом транспортної мережі; значною нерівномірністю дорожніх і транспортних умов перевезень (від ґрунтових – до шосейних доріг і відповідних транспортних потоків). Транспортування в аграрній галузі перебуває під значним впливом випадкового характеру обсягів перевезень, що має значне розсіювання; великої різноманітності властивостей вантажів (від надлегких об'ємних матеріалів – до небезпечних і важковагових), що унеможливує повне використання вантажності рухомого складу. До того ж у нашій країні склалися такі організаційні умови, які не дають змоги сільськогосподарським виробникам контролювати процеси доставки їхньої продукції споживачам повною мірою. Причин тут декілька: по-перше, парк наявного рухомого складу застарів (понад 70 % одиниць його чисельності в Західному регіоні України перебувають у граничному робочому стані), тому ймовірність відмов є дуже високою, а можливі заходи з керування надійністю парку – неефективними; по-друге, дрібні аграрні виробники, яких серед фермерських господарств на заході України є

більшість, не можуть собі дозволити утримувати парки власних автомобілів навіть для внутрішніх перевезень, тому користуються послугами транспортно-експедиційних і логістичних компаній [7]. Через це для організації чіткої і злагодженої роботи автомобільного транспорту в аграрній галузі необхідно забезпечити новий вид оперативного керування перевезеннями. Таке керування стосується ситуаційного вибору оптимальних маршрутів руху, раціонального вибору типу й кількості рухомого складу, обґрунтованого проектування пакувальних, кріпильних і навантажувальних робіт. Зрештою, це передбачає підвищення організаційного рівня диспетчерського керування перевезеннями. Однак існує проблема запровадження онлайн-експлуатації автотранспорту в багатьох контекстах, починаючи від підготовки та доставки вантажів і закінчуючи розміщенням вантажівок у компаніях-перевізниках. Конкретніше, проблема маршрутизації транспортних засобів (ПМТЗ) стосується проектування множини автомобільних маршрутів, виконання яких характеризується мінімальними витратами, які здійснюються із задоволенням попиту на сільськогосподарську продукцію групи географічно розпоршених споживачів, задовольняючи групу оперативних обмежень. З інформаційного погляду такі проблеми, як правило, включають два виміри оперативного керування: еволюцію та

якість інформації [1]. Еволюція інформації пов'язана з тим, що в деяких оперативних задачах інформація, доступна планувальнику, може змінюватися під час виконання маршрутів, наприклад, з надходженням нових запитів клієнтів. Якість інформації відображає можливу невизначеність щодо наявних даних, наприклад, коли попит замовника відомий лише як оцінка його діапазону. Крім того, залежно від проблеми та наявної технології, маршрути руху автомобілів можуть бути розроблені апріорі або в режимі онлайн. У динамічних та детермінованих задачах, які також називаються онлайн-задачами в Інтернеті, частина або весь обсяг вхідних даних невідомий і виявляється динамічно і непередбачуваним під час проектування або виконання маршрутів [16]. На сьогодні такі задачі становлять значну складність через великий рівень невизначеності та нелінійний характер.

З іншого боку, динамічні та стохастичні задачі організації перевезень сільськогосподарської продукції передбачають часткові стохастичні знання про динамічно здобуту інформацію. У цих задачах маршрутизація здійснюється покроково. Такий підхід вимагає відповідної технологічної підтримки й системи підтримки рішень. Технологічне забезпечення здійснюється з допомогою зв'язку в режимі реального часу між транспортними засобами та особою, що приймає рішення (наприклад, мобільні телефони та системи глобального позиціонування). Відповідні технології й засоби розвинені і доступні. Методи розв'язання оперативних задач диспетчерського керування автотранспортом на сьогодні є актуальними і розглядаються в дослідженнях науковців.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Задачі динамічної маршрутизації (ДМ) мають достатньо давню історію. Вперше було сформульовано й зроблено їх початковий огляд у праці Г. Н. Псарафтиса у 1988 р. [15]. У роботах Р. Ларсена [4], П. Джалет і М. Р. Вагнера [9] та В. Піллака [13] запропоновано різноманітні алгоритми розв'язування задач ДМ. Однак усі ці автори використовували методи, які раніше зі змінним успіхом застосовувалися до статичних задач. Це були методи найближчого сусіда [1], метод табу на окрему множину рішень [1], мурашиний, інші евристичні та метаевристичні методи.

Динамізм у маршрутизації може виникати з різних причин. Найпоширенішим джерелом динамізму є прихід нових споживачів з попитом на

послуги перевезення [8; 10]. Інші дослідники розглядають динамічно виявлені вимоги до набору відомих клієнтів [16], динамічного часу поїздки [14] та доступності транспортних засобів [16]. Однак дослідження, в яких динаміка маршрутів і графіку руху автомобільних транспортних засобів (АТЗ), пов'язана з їх надійністю, раптовими відмовами або зниженням запланованих показників виконання транспортних завдань, невідомі.

Той факт, що на розподіл і доставку сільськогосподарських товарів впливають дуже різні чинники, що є наслідком запитів транспортних компаній, клієнтів та зовнішнього середовища, зробив ПМТЗ однією з найбільш актуальних і сучасних тем серед оперативних досліджень [9; 17; 18]. Останніми роками ці чинники трансформуються або до обмежень, або до змінних проблеми і, зрештою, призводять до створення різних варіантів ПМТЗ, сформульованих та вивчених дослідниками. Більше того, управління логістикою та операціями в ланцюгах поставок посилюється завдяки використанню алгоритмів, інтегрованих в інформаційні системи, що дозволяють оптимізувати випадки реального розподілу. У праці [17] представлена класифікація різних варіантів ПМТЗ, пов'язаних з вантажними перевезеннями, а також алгоритми розв'язання однокоренових задач. Авторами статті запроваджено нову класифікацію, засновану на ознаках тих стадій ДМ, коли виникають суттєві складнощі в обчислювальному процесі для прийняття рішень. Однак задачі ДМ залишаються поки що складними в пошуку оптимального розв'язку і неподіленими за класифікаційними ознаками. Виходячи з розглянутої статті, можна зробити висновок, що відповідна попередня обробка динамічних подій у поєднанні з обробкою стохастичної інформації про можливі майбутні події, як правило, дає кращі результати порівняно з короткотривалим математичним програмуванням [15] або чисто апріорними підходами. Проте слід зазначити, що ці підходи є витратними за обчислювальними ресурсами, що обмежує, наприклад, кількість сценаріїв, які можна розглянути.

Більшість видів сільськогосподарської продукції належить до такої, що швидко псується. Вантажі, які швидко псуються (ВШП), поділяються на дві групи щодо концепцій погіршення стану: перша – коли всі вантажі, які перевозяться, одночасно втрачають придатність у кінці горизонту планування; друга – коли процес псування настає поступово. Часові допуски (вікна) на

відправку й постачання такої продукції, розмір горизонту прогнозування є головними показниками організації перевезень ВШП [12]. З огляду на це маршрути доставки необхідно складати так, щоб постачальник міг забезпечити свіжими продуктами та задовольнити потреби замовників з урахуванням графіка процесу виробництва. Однак мало що зроблено для дослідження координації планування виробництва та планування поставок ВШП. Традиційний графік складається так, щоб лише деякі показники ефективності були оптимізовані без урахування плану постачання [5]. З іншого боку, планування розподілу, як правило, фокусується на мінімізації транспортних витрат готової продукції і не впливає на графік виробництва. Тому координація планування виробництва та постачання є важливою невирішеною проблемою у сільськогосподарському виробництві та переробній промисловості і терміново потребує подальших досліджень.

У статті [5] запропоновано багатоцільову модель, з допомогою якої можна мінімізувати погіршення ВШП під час транспортування та скоротити відстань, пройдену АТЗ. Велика кількість одночасних завдань на доставку вантажів робить ПМТЗ такою, яка не дає точного розв'язку або розв'язку взагалі. Щоб упоратись із заявленою багатоцільовою проблемою, лише перші 5–10 завдань були вирішені за допомогою точних методів, наприклад, AUGMECON. Оскільки застосований метод точного розв'язання представляє обмеження, не стаючи ефективним для великих обсягів даних, за розумний час, інші завдання розв'язувались за допомогою еволюційного алгоритму Соломона. Таким чином, підхід для ДМ, запропонований у згаданій статті, є лише гібридним рішенням, яке не знімає проблеми невизначеності отриманих розв'язків. З іншого боку, уже за сучасних персональних комп'ютерів задовільні результати можна отримати за розумний час. Висновок, який декларується в зазначеній та багатьох інших працях, говорить про те, що застосування підготовлених вхідних даних є способом наближення до точного розв'язання задач ДМ.

Аналіз відомих методик маршрутизації та складання розкладів транспортних засобів показав, що в разі зростання кількості замовлень, особливо незапланованих, вони стають неефективними за якістю результатів. Застосування попередньої класифікації є способом, який покращує результат. Так, у праці [11] було доведено, що класифікація замовлень на пере-

везення дає змогу зменшити розмірність задачі та знайти гарантований оптимальний розклад транспортного процесу (ТП), якщо під час реалізації складеного плану перевезень виникають нові замовлення. При цьому кожне замовлення – це великогуртова доставка вантажів між заданими двома пунктами транспортної мережі. Сучасні транспортні компанії намагаються знизити марний пробіг, тому критерієм побудови маршрутів виконання заданої множини замовлень для парку АТЗ є мінімальні непродуктивні витрати. Однак згадані дослідження стосувались магістральних перевезень. Головним критерієм для перевізника тут, переважно, є максимальний пробіг з вантажем упродовж заданого періоду за мінімальної тривалості марних пробігів. Дослідження показали вищий рівень нового алгоритму стосовно кількості фактично виконаних планових і незапланованих замовлень, показників тривалості проекту при сталому горизонті прогнозування. Подібний зміст процесів доставки сільськогосподарських вантажів дає підставу застосувати метод оптимізації з попередньою класифікацією і групуванням замовлень і для дрібногуртової доставки вантажів, яка притаманна перевезенням ВШП на кільцевих маршрутах [18].

Постановка завдання. Мета досліджень – забезпечити гарантований стабільний результат оптимізації маршрутів за великих обсягів вхідних даних та динамічних вхідних даних у разі дрібногуртового перевезення ВШП.

Мета досягається розв'язанням таких задач: 1. Проаналізувати відомі сучасні методи ДМ і розробити такий, що забезпечує стійкий задовільний розв'язок за великих обсягів вхідних даних. Маршрутизація повинна виконуватись заодно зі складанням оптимальних за тривалістю розкладів виконання перевезень; 2. Запропонувати методи попередньої обробки вхідних даних, які забезпечують розв'язання задачі ДМ за великого розміру вхідних даних.

Зміст задачі ДМ при доставці ВШП від сільськогосподарських виробників до заготівельних підприємств або від централізованих складів до споживачів полягає в тому, що на заданому горизонті прогнозування T_{pr} є відомою множина P замовлень $Z_i, i=1 \dots N$ на перевезення вантажів. Для кожного із замовлень задано обсяг q_i , вид вантажу, початковий x_i й кінцевий y_i пункти маршрутів. Кожне замовлення має часове вікно, – допустимий час, упродовж якого вантажі мають бути доставлені за призначенням. Часові вікна сформовані під

впливом допустимих термінів збирання та переробки сільськогосподарської продукції, з одного боку, та попиту споживачів – з іншого. Межі часового вікна: $t_{b,i}$ – найбільш ранній момент часу, до якого замовлення неможливо виконати; $t_{e,i}$ – найбільш пізній момент часу, не пізніше якого це замовлення повинно бути виконане. Зміст замовлення полягає в тому, що транспортна компанія має завантажити ВШП в термін, який конкретно задано аграрним виробником, і доставити його в пункт приймання саме вчасно. Транспортний зміст множини замовлень P на перевезення ВШП можна відобразити графом

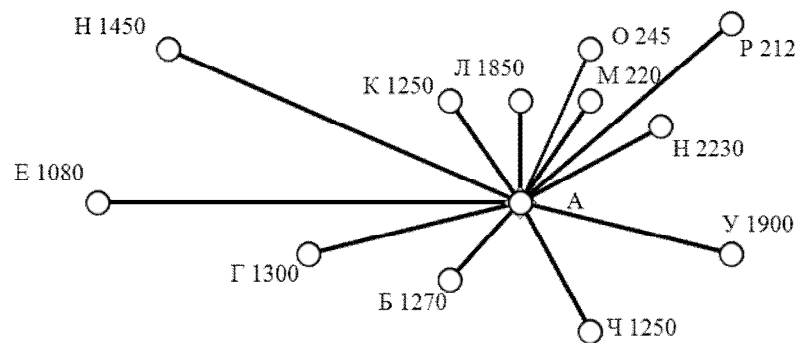


Рис. 1. Граф вантажопотоків доставки сільськогосподарських вантажів у пункт збору: літерами позначено транспортні пункти відправлення/приймання вантажів, цифрами – розмір одноразового гурту доставки, кг
Fig. 1. Graph of cargo flows of agricultural products delivery to the collection point: letters indicate the transport points of departure/acceptance of goods, numbers – the size of a one-time delivery group, kg

Часові параметри замовлень впливають на розклад їх виконання. Розклад доставки вантажів – це сукупність моментів прибуття АТЗ в пункт завантаження для виконання i -го замовлення, $i=1\dots N$, – t_{x_i} , або їх завершення/розвантаження в пункті призначення – t_{y_i} . Різниця між цими моментами відображає часовий зв'язок i -го замовлення із замовленням j , яке виконувалось раніше одним і тим же ж автомобілем на одному й тому ж маршруті [2]:

$$-a_{j,i} \leq t_{x,j} - t_{x,i} \leq a_{i,j}, \quad (1)$$

де $a_{j,i}$, $a_{i,j}$ – відповідно прямий і обернений часовий зв'язок i -го та j -го замовлень, які виконуються послідовно в порядку відповідно $i \rightarrow j$ або $j \rightarrow i$.

Якщо часове впорядкування замовлень виконане коректно, то вираз (1) справджується для будь-яких двох замовлень, що відомі на горизонті прогнозування. Вираз (1) також означає, що виконання замовлень у порядку $i \rightarrow j$ та $j \rightarrow i$ є диз'юнктивними подіями.

вантажопотоків (рис. 1). Вершинами графа є пункти відправлення/приймання вантажів, а ребра – це потенційні вантажопотоки. Числа біля вершин означають обсяги вантажів згідно із замовленнями, кг. Коли йдеться про заготівельні процеси, то обсяг відправлення ВШП з кожного замовлення є меншим, ніж номінальна вантажність середньо- і великовантажного АТЗ q_n , який використовується на магістральних маршрутах. Такі замовлення характерні, наприклад, при заготівлі молочної продукції, фруктів, овочів, квітів тощо. Середні обсяги одного гурту ВШП є в межах 150–2700 кг [2].

Усі часові зв'язки множини P відомих замовлень відображає матриця часових зв'язків $\|a_{i,j}\|$, або орієнтований змішаний граф $H(G,U,V)$, де G – множина вершин, $g_1\dots g_N$, що символізують моменти виконання замовлень. Вершина g_0 графа G – фіктивна, представляє формальний момент початку всього ТП. Вершина g_{N+1} – фіктивна, символізує кінець ТП тривалістю, що не перевищує T_{pr} . U – множина дуг, кожна з яких відображає часовий зв'язок $a_{i,j}$ між виконанням i -го та j -го замовлення одним і тим же ж АТЗ. Дуги графа H – зважені. V – це ребра графа (обопільні дуги), представлені парою ваг $a_{i,j}$, $a_{j,i}$. Ребра і дуги графа H в сукупності показують потенційно можливу структуру ТП, однак вони не відображають однозначного розкладу [3]. Загалом виконання j -го замовлення фактично відображається в графі єдиною дугою ваги $a_{i,j} > 0$. Дуги $a_{0,i}$ – це найбільш ранній момент можливого початку виконання i -го замовлення. Кожна дуга $a_{i,N+1}$ – це часовий зв'язок, «чиста» тривалість

виконання i -го замовлення так, що ніби АТЗ до початку завантаження перебував уже в i -му пункті і на марний чи нульовий пробіги не витрачено часу. Для того щоб шуканий розклад був коректним (не було часового неузгодження), потрібно, щоб у графі H були відсутні замкнуті контури. Момент початку виконання будь-якого i -го замовлення шукається зі співвідношення [2]:

$$t_{x,i} = \max_j \{0, \vartheta_{i,j}\}, \quad 1 < j < N, \quad (2)$$

де $\vartheta_{i,j}$ – шлях найбільшої додатної ваги, який проходить через вершини i, j графа.

Момент завершення будь-якого i -го замовлення знаходимо з виразу

$$t_{y,i} = t_{x,i} + a_{i,j} < t_{e,i}. \quad (3)$$

Розклад, при якому для всіх замовлень й усіх автомобілів виконується умова (2), називається активним, а величина $t_{y,i}$, що розрахована за (3), буде найбільш раннім завершенням i -го замовлення.

Через те, що обсяг гурту ВШП відповідних замовлень є $q_i < q_n$, де q_n – номінальна вантажність АТЗ, то перевізники зацікавлені в тому, щоб поєднати в одному маршруті виконання декількох замовлень. Якщо в плановому періоді T_{pr} замовлень більше, ніж наявних АТЗ, то розклад повинен передбачати наступний пункт завантаження після виконання попередньої доставки ВШП. Маршрут кожного АТЗ планується перевізником у часі й з урахуванням ефективності роботи всього парку. Застосовано критерій оптимального розкладу – мінімальна сумарна гарантована тривалість перевезення всіх ВШП за умови мінімальних витрат ресурсів на перевезення. Умови цієї задачі стосуються обласної радіально-кільцевої транспортної мережі. Можливі рішення можуть бути у вигляді кільцевих розвізних/збірних, маятникових або комбінованих маршрутів.

Тривалість виконання кожного із замовлень є випадковою величиною, яка може бути оцінена математичним сподіванням t_i та середнім відхиленням σ_i . Непередбачені обставини під час виконання ТП є такими, що відхилення σ_i може перевищувати часові вікна замовлення. Це призводить до потреби застосування змін у маршруті. Знайдені розв'язки статичної задачі маршрутизації, які раніше задовольняли диспетчерські служби перевізника за точністю і надійністю, можуть бути при цьому неоптимальними і ненадійними [19]. На практиці максимальна кількість запланованих замовлень не перевищує 100–120, що дає змогу побудувати наближений до

оптимального розклад з оцінкою його відхилення. Для цього застосовують евристичні алгоритми, такі як мурашиний, гілок і меж, Кларка–Райта та ін. Ці алгоритми дають хоча й приблизний, але задовільний результат [6]. У випадку із задачею ДМ такий розв'язок є нестабільним і незадовільним. Тому основним завданням цих досліджень було вдосконалення відповідного методу так, щоб отримувати стабільний, достатньо точний оптимальний розв'язок не тільки на початковому кроці маршрутизації і складання розкладів, а й за оперативної зміни вхідних даних.

Виклад основного матеріалу. Плановий оптимальний розклад – це множина мінімальних моментів часу завершення $t_{y1}, t_{y2}, \dots, t_{yN}$ виконання замовлень, обчислених за виразом (3), за умови, що в даному транспортному процесі задіяна мінімальна кількість автомобілів k_{\min} із заданих k . Мінімальна гарантована тривалість виконання ТП, T_1 – це така, при якій не існує жодного іншого варіанта ТП, такого, що його тривалість $T_2 < T_1$, і жодне замовлення не буде виконане пізніше, ніж момент часу T_1 . Оптимальний статичний розв'язок задачі маршрутизації та складання розкладів можна з достатньою точністю знайти, впорядкувавши початковий граф часових зв'язків H , отримавши граф H_1 , в якому немає ребер, а також відсутні контури додатної ваги й усі ваги дуг підпорядковуються виразу (1). Однак під час виконання всього обсягу перевезень у деякий момент часу від нульового відліку $0 < t < T_{pr}$ виникають непередбачені обставини, серед яких можливі такі:

- відмінено прогнозоване замовлення;
- збільшився/зменшився прогнозований час транспортування t_{ij} , де i, j – відповідно пункт відправлення і приймання вантажу;
- транспортний засіб вийшов з ладу і зійшов з маршруту.

Такі події мають випадковий характер і згідно з раніше проведеними нами дослідженнями підпорядковуються Пуассонівському закону [11]. Внаслідок цього перевізник може прийняти або відхилити одне з можливих рішень:

- змінити послідовність виконання замовлень через зміну дорожніх/транспортних умов;
- змінити кількість транспортних засобів на маршрутах, у тому числі з урахуванням резерву.

У цій статті ми зосередили увагу на непередбачених обставинах, які стосуються раптової зміни дорожніх/транспортних умов на запланованому маршруті. Оскільки покращання умов руху не зменшує середньої експлуатаційної

швидкості АТЗ, а також не впливає на порушення планового оптимального розкладу і часового вікна, то розглядатимемо погіршення тільки цих умов.

Зміст задачі було формалізовано так. Якщо в ТП задіяно k_1 АТЗ, то вони повинні працювати синхронно, кожен виконуючи по декілька замовлень послідовно. Отже, у графі H потрібно знайти k ланцюгів, які починаються у фіктивній вершині g_0 , не більш одного разу проходять через деякі вершини, які стосуються наявних замовлень, і закінчуються у вершині g_{N+1} . Сукупність таких ланцюгів відображає k розвізних/збірних маршрутів. У цьому варіанті задачі шукаємо мінімальний час виконання всіх заданих замовлень за умов: 1) виконання кожного замовлення відбувається в рамках його часового вікна; 2) для перевезення ВШП буде залучено мінімальну кількість АТЗ, що фактично означає їх максимальну продуктивність. Отже, тривалість найдовшого ланцюга повинна бути мінімальною, а шлях від фіктивної вершини g_0 до будь-якої заданої g_i не повинен перевищувати $t_{y,i}$. Шукані ланцюги виконання замовлень мають проходити по тих вершинах, для яких розмір гурту відправки $q_i > 0$. Якщо ланцюг доходить до вершини y , а далі нема жодного шляху у графі H , то ланцюг прямує до вершини g_{N+1} . Задача є схожа на типову задачу декількох комівояжерів [1]. Однак, на відміну від статичної маршрутизації, ДМ передбачає, що під час виконання всієї множини замовлень P за попередньо складеним розкладом проводиться моніторинг вхідних даних з періодичністю τ . Потреба нової маршрутизації виникає, якщо під час виконання ТП виявиться, що для будь-якого k -го АТЗ справедливо:

$$\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_\zeta + a'_{ij} + a'_{ij+1} + \dots + a'_{ij+n} \geq T_{pr}, \quad (4)$$

де τ_ζ – період контролю; $a'_{ij}, \dots, a'_{ij+n}$ – нові часові зв'язки замовлень, які раніше були заплановані для r -го АТЗ, але ще не виконані на момент контролю $\tau_\zeta, r=1 \dots k$.

На рис. 2, а показано приклад попередньої складеної маршрутної схеми виконання замовлень, які були відомі на горизонті прогнозування T_p на основі відомих вантажопотоків (див. рис. 1).

Із застосуванням методу гілок і меж (МГМ) було отримано спочатку активний найкоротший розклад виконання замовлень, згідно з яким розроблено такі маршрути:

1) А–Б–Г–Е–Н–К–Л–А з відповідними часовими зв'язками: $a_{AB}=1,0$ год; $a_{BL}=1,2$ год; $a_{LE}=2,3$ год; $a_{EN}=2,2$ год; $a_{NK}=3,0$ год; $a_{KL}=0,2$ год; $a_{LA}=0,4$ год;

2) А–Н–М–А з часовими зв'язками: $a_{AN}=0,7$ год; $a_{NM}=0,3$ год; $a_{MA}=0,6$ год;

3) А–Ч–У–Р–А з відповідними часовими зв'язками: $a_{AC}=1,2$ год; $a_{CU}=1,0$ год; $a_{UR}=3,2$ год; $a_{RO}=0,9$ год; $a_{OA}=1,3$ год.

Найтриваліший маршрут № 1 – 9,6 год. Ця величина становитиме мінімальну гарантовану тривалість доставки. Допустима тривалість виконання замовлень на цьому маршруті $t_{y,i}=10$ год. За 1 год після початку виконання замовлень перевізникові надійшла інформація про ймовірні затори на ділянці К–Л мережі, внаслідок чого тривалість руху по цій ділянці зростає, ймовірно, до 1,1 год. Якщо виконати коригування початкового розкладу ТП, то нова схема набуде вигляду, як на рис. 2, б:

1) А–Б–Г–Е–Н–К–А;

2) А–О–Н–М–Л–А;

3) А–Ч–У–Р–А.

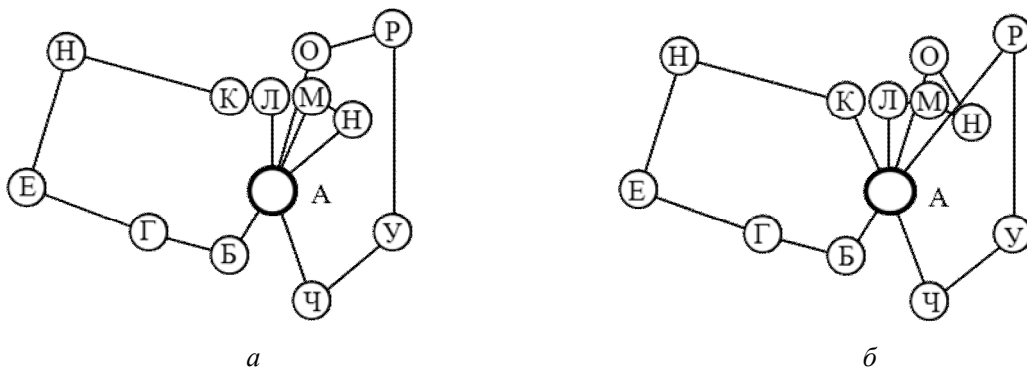


Рис. 2. Маршрути з виконання замовлень із доставки сільськогосподарської продукції:

а – початкова оптимальна схема; б – схема після коригування

Fig. 2. Routes for execution of orders for delivery of agricultural products:

а – the initial optimal scheme; б – scheme after adjustment

Тепер найтриваліший маршрут № 1 матиме тривалість 9,4 год, що також не перевищує часових вікон. Однак зауважимо, що можливість коригувати розклад і маршрут так, щоб загальний критерій оптимізації не погіршувався і обмеження були дотримані, втрачається в міру зменшення фактичного горизонту прогнозування. Так, за аналогічної оперативної інформації, яка надійде через 2 год від початку ТП, гарантована мінімальна тривалість доставки зростає вже до 9,8 год, а через 3 год – потрібно залучати додатковий, 4-й, АТЗ, щоб вкластись у часове вікно. Такий результат є не цілком задовільним, тому було запропоновано алгоритм ДМ, який полягає в таких кроках:

1. На основі оперативної інформації на момент контролю τ_c потрібно знайти новий граф, H_2 , що походить з графа H_1 . У граф H_2 потрібно включити ті дуги й ребра, які були у графі H , але відсутні у графі H_1 . З графа H_2 потрібно виключити ті вершини, які символізують уже виконані замовлення разом із відповідними їм часовими зв'язками.

2. Використовуючи вже згадані відомі алгоритми пошуку мультишляхів у графах, побудувати новий граф H_3 , який, як і попередній граф H_1 , відповідатиме умовам оптимальності. На основі графа H_3 розробити новий план маршрутів, за якого початкові показники перевезень не погіршуються.

Формальний зміст задачі ДМ полягає у впорядкуванні графа H . Впорядкування означає, що у графі H потрібно ліквідувати цикли, крім тих, які сполучають вершини з центральною. Алгоритм розв'язування цієї задачі для відносно невеликої кількості замовлень і детермінованої тривалості кожного замовлення базується на МГМ і його розроблення є достатньо опрацьованим [2]. Мета цих досліджень – підвищити ефективність алгоритму для випадку, коли тривалості руху є випадковими величинами, а сам процес доставки вантажів – стохастичний. Застосування МГМ при побудові оптимального за тривалістю розкладу руху АТЗ і вибору їх маршрутів полягає в тому, що всі можливі комбінації послідовностей виконання замовлень поділяють на множини і серед них вибирають ту, яка має ознаки близькості до оптимального рішення. Далі вибрану підмножину знову поділяють і вибір повторюється. Пошук триває до того стану, доки не буде знайдено оптимальний розклад. Різновиди МГМ стосуються ознак оптимальності, які застосовують: поточний рекорд, ступінь вільності

вибору та ін. У цих дослідженнях було застосовано ознаку сумісності замовлень в єдиному потоці.

Якщо внаслідок додаткової оперативної інформації доведеться змінити розклад ТП у зв'язку з нерівністю (2), то побудова графа H_3 буде локальним оптимумом на нових вхідних даних, а якість нового розкладу може бути гіршою. Однак якщо оперативні зміни матриці часових зв'язків не впливають на структуру графа H_1 , то оптимальне рішення стосовно розкладу залишиться незмінним. Отже, складаючи початковий розклад на увесь горизонт T_{pr} , потрібно вибирати такі ланцюги подій, за яких часові зміни не впливають на них. Для вдосконалення алгоритму ми застосували попередній аналіз замовлень. Усі замовлення, які були відомі на початку горизонту прогнозування T_{pr} , можна згрупувати за такими ознаками, які відображають стійкий зв'язок між ними, що не залежить від випадкових змін в умовах виконання замовлень. Для класифікації застосовано декілька ознак, лише окремі з них є більш суттєвими для впорядкування часової графічної моделі [1]. *За частотністю* відрізнятимемо одноразові, періодичні і постійні замовлення. Ця класифікаційна ознака стосується замовлень між сталими двома пунктами, один з яких є відправником, інший – споживачем вантажів. Одноразові виникають один раз за всі періоди планування. Періодичні відрізняються тим, що між моментами їх надходження існує час паузи, який є, у загальному випадку, випадковою величиною. Постійні замовлення характерні тим, що вони завжди існують у пункті відправлення вантажів, незалежно від моменту прибуття туди транспортного засобу під завантаження. *За сумісністю* замовлення Z_1 і Z_2 поділятимемо на цілком сумісні, частково сумісні й несумісні. Цілком сумісними назвемо такі замовлення i, j , виконання яких у послідовності $i \rightarrow j$ одним АТЗ характеризується повною відсутністю марних пробігів, простоїв в очікуванні завантаження і затримок доставки (рис. 3, а). Частково сумісними є такі замовлення, виконання яких призводить до необхідності марного пробігу і/або простою в очікуванні наступного завантаження (рис. 3, б). Несумісність замовлень Z_1 і Z_2 унеможливує їх виконання в одному потоці одним автомобілем через наявність часових вікон, які повністю перекриваються. Моделі цілком сумісних і частково сумісних замовлень на перевезення показано на рис. 3, а, б відповідно.

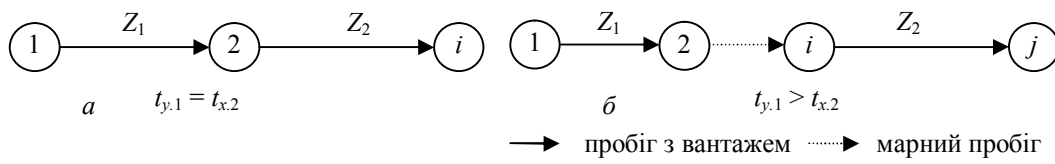


Рис. 3. Моделі сумісності транспортних замовлень: *a* – цілком сумісні; *b* – частково сумісні
Fig. 3. Models of compatibility of transport orders: *a* – completely compatible; *b* – partially compatible

Якщо позначити вказані відношення: *com* – цілком сумісні, *inc* – несумісні, *pc* – частково сумісні, то можна записати такі логічні вирази, які впливають з означень для замовлень *a*, *b*, *d*:

1. Якщо *a com b*, то *b inc a*.
2. Якщо *a com b* і *b com d*, то *a pc d*.
3. Якщо *a com b* і *a com d*, то *b pc d*.
4. Якщо *a pc b* і *a inc d*, то *d pc b*.

Це є початкові логічні залежності, на основі яких, використовуючи алгебру логіки, можна записати й інші логічні вирази, які поєднують замовлення у транспортні завдання для АТЗ. Якщо маршрути доставки ВШП складатимуться зі сумісних подій, то такі маршрути будуть найменш тривалими і не належатимуть до критичних [14]. Усі замовлення в множині *P* можна частково впорядкувати на основі відношень сумісності. Це полегшує пошук у великому масиві вхідних даних і підвищує точність алгоритму. Так, якщо з множини *P* виокремити підмножину замовлень *P*₁, таку, що всі замовлення, які до неї входять, є сумісними, то очевидно, що для побудови розкладу ТП за МГМ використовуватиметься підмножина *P*₂=*P*/*P*₁. Таким чином, спростивши умови й розмірність початкової задачі, на відміну від евристичних або метаввристичних алгоритмів, ми отримали можливість успішно застосувати метод лінійного програмування для подальшого розв’язання. Зміст його полягає в такому. Розглянемо будь-які два замовлення *Z*_{*i*} і *Z*_{*j*}, які належать до сумісних або частково сумісних у порядку *i*→*j*. Це означає, що в матриці $\|a_{ij}\|$ значення $a_{ij} = +\infty$. Кожному варіанту структури ТП можна поставити у відповідність множину чисел ξ_{ij} , які дорівнюють одиниці, якщо відповідна пара замовлень *i*, *j* виконується в одному потоці, послідовно, одним автомобілем, і нуль – у протилежному випадку. Задача пошуку найкоротшого за тривалістю ТП полягає в пошуку матриці $\|\xi_{ij}\|$ з мінімумом лінійної функції:

$$T_1 = \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^{N+1} a_{ij} \xi_{ij}, \quad (5)$$

з обмеженнями

$$\sum_{j=1}^N (\xi_{ij} - \xi_{ji}) = 0 \quad i \neq 0, i \neq N+1, \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^N (\xi_{0,j} - \xi_{j,0}) = 1, \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^N (\xi_{N+1,j} - \xi_{j,N+1}) = -1. \quad (8)$$

Запропоновані методику й алгоритм було застосовано і для більшого тестового масиву даних. На транспортній мережі, яка відображає Львівську область, тобто розміром приблизно 150×150 км, розглядалися замовлення на доставку ВШП від аграрних виробників регіону до обласного центру на спеціалізований склад продукції. Кількість постачальників – 44. Парк АТЗ початково розташований в обласному центрі. Його чисельність – 40 автомобілів. Перевезення виконуються одномарковим рухомим складом, автомобілями номінальною вантажністю 5 т. Кількість замовлень, обсяг перевезень у межах горизонту прогнозування – це сталі величини. Середній розмір гурту вантажів до перевезення – 900 кг. Отже, вантажомісткість транспортних засобів була такою, що є можливість виконати наявні замовлення, використовуючи збірні кільцеві маршрути. Максимальний горизонт планування становив 9,5 год безперервного часу, тобто одну робочу зміну. Кожне замовлення характеризується середньою тривалістю його виконання і часовими вікнами. Таким чином, у множині замовлень були встановлені відношення сумісності між парами подій. У множині замовлень була частка цілком сумісних – 10 %, частково сумісних – 50 %, несумісних – 40 %. Усі замовлення є неперіодичними, а замовники (агропідприємства) так розташовані на вказаній географічній території, що в проєкті залучено 6,3 тис. км загальної протяжності доріг обласного і державного значення для виконання всіх замовлень. Упродовж планового періоду до перевізника щогодини надходить інформація про стан дорожніх і транспортних умов в області, а також про технічний стан рухомого складу. Ймовірність перевищення запланованої тривалості

руху на будь-якій ділянці транспортної мережі представлено Пуассонівським процесом з інтенсивністю $\lambda=0,09$ год затримки за годину. Було виконано оптимізацію початкової схеми маршрутів та розкладів, а потім – при зміні

тривалостей руху на маршрутах через відповідно 1, 2, 3 год від початку виконання перевезень. У таблиці подано результати оптимізації за двома методиками: за застосування запропонованої класифікації замовлень і групування їх і за МГМ.

Таблиця. Порівняння досягнутих показників якості побудованих динамічних розкладів і маршрутів
Table. Comparison of the achieved quality indicators of the constructed dynamic schedules and routes

Показник, одиниця вимірювання	Метод побудови		Рівень нового алгоритму, %
	гілок і меж, без класифікації замовлень	гілок і меж з попередньою класифікацією замовлень	
Кількість задіяних автомобілів	18	16	-11,1
Мінімальна гарантована доставка, год	6,2	5,5	-11,3
Сумарна тривалість пробігу всіх автомобілів з вантажем, год	316	312	-1,3
Сумарний марний пробіг усіх АТЗ, км	11	9	-18,2
Сумарні відхилення від початкової гарантованої тривалості проєкту, год	84	47	-44,0

Як видно з таблиці, у новій запропонованій методиці було досягнуто скорочення гарантованої тривалості доставки ВШП понад 11 % порівняно з класичним МГМ. При цьому інтенсивність використання автомобілів також підвищилась. Такий результат є достатньо стійким до змін в умовах перевезень. Так, за збільшення тривалості руху на маршруті на 9 % за 3 год від початку виконання проєкту показники ТП, побудовані МГМ з попередньою класифікацією, залишилися практично незмінними. Це спостерігалось тому, що маршрути АТЗ з виконання сумісних замовлень є менш тривалими і не входять у критичний шлях проєкту.

Висновки. Значна мінливість чинників під час доставки сільськогосподарської продукції, з одного боку, а також зростання рівня вимог до її якості і збереження, з іншого, формують необхідність оперативного контролю за транспортними процесами. Це означає, що від статичних методів маршрутизації потрібно переходити до динамічних методів складання розкладів і маршрутів. Однак більшість сучасних відомих методів ДМ є неспроможні забезпечити задовільний результат у разі великих обсягів вхідних даних.

Запропонований нами метод складання динамічних розкладів і маршрутів відрізняється від відомих тим, що множини вхідних даних у ньому (замовлень на перевезення) спочатку попередньо класифікуються за сумісністю обробки в єдиному потоці. А далі розклад і маршрут можна побудувати методами лінійного

програмування, які дають гарантований точний розв'язок. Крім того, результати оптимізації маршрутів і розкладів руху автотранспортних засобів ними за запропонованим методом є стійкими до зміни транспортних і дорожніх умов. Перевірка методу на тестовій моделі показала, що метод границь і меж із попередньою класифікацією демонструє приблизно на 11 % меншу гарантовану тривалість доставки всіх вантажів. При цьому також на 11 % підвищується використання вантажних автомобілів і скорочується їх непродуктивний пробіг.

У подальших дослідженнях потрібно встановити максимальну ефективність запропонованого методу в сенсі обсягу вхідних даних, кількості замовників, розміру горизонту прогнозування.

Розроблений метод може бути використаний для диспетчерського керування вантажними автомобільними перевезеннями під час планування доставки вантажів, які мають стислі допустимі терміни доставки.

Бібліографічний список

1. Олісевич М. С., Мастикаш О. Л., Рой М. П. Залежність ефективності діяльності і кооперації перевізника від вхідного потоку замовлень. *Transport development*. 2020. № 1 (6). С. 103–115.
2. Підвищення ефективності доставки збірних вантажів автомобільним транспортом / І. Я. Сковрон та ін. *Транспортні системи та технології перевезень*. Дніпро, 2020. Вип. 20. С. 36-43.
3. Танаев В. С., Сотсков Ю. Н., Струевич В. А. Теория расписаний. Многостадийные системы. Москва: Наука, 1989. 328 с.

4. Anderluh A., Larsen R., Hemmelmayr V. C., Nolz P. C. Impact of travel time uncertainties on the solution cost of a two-echelon vehicle routing problem with synchronization. *Flexible Services and Manufacturing Journal*. 2020. 32(4). P. 806–828.
5. Buelvas Padilla M. P., Nisperuza P. A., López Pereira J. M., Hernández Riaño H. E. Vehicle routing problem for the minimization of perishable food damage considering road conditions. *Logistics Research*. 2018. 11(2). P. 1–18.
6. Çimen M., Soysal M. Time-dependent green vehicle routing problem with stochastic vehicle speeds: An approximate dynamic programming algorithm. *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*. 2017. 54. P. 82–98.
7. Filina-Dawidowicz L., Stankiewicz S. Organization and Implementation of Intermodal Transport of Perishable Goods: Contemporary Problems of Forwarders. *Sustainable Design and Manufacturing 2020*. Springer, Singapore, 2021. P. 543–553.
8. Ichoua S., Gendreau M., Potvin J.-Y. Exploiting knowledge about future demands for real-time vehicle dispatching. *Transportation Science*. 2006. 40(2). P. 211–225.
9. Jaillet P., Wagner M. R. Online vehicle routing problems: A survey. *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*. Boston MA: Springer, 2008. P. 221–237.
10. Okulewicz M., Mańdziuk J. The impact of particular components of the PSO-based algorithm solving the Dynamic Vehicle Routing Problem. *Applied Soft Computing*. 2017. 58. P. 586–604.
11. Oliskevych M. Dynamic scheduling of highway cargo transportation. *ICCPT 2019: Current Problems of Transport: Proceedings of the 1st International Scientific Conference*, May, 28-29, 2019. Ternopil, Ukraine, 2019. P. 141–151.
12. Optimization of transportation routing problem for fresh food by improved ant colony algorithm based on tabu search / J. Chen et al. *Sustainability*. 2019. 11(23). P. 65–84.
13. Pillac V., Gendreau M., Guéret C., Medaglia A. L. A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*. 2013. 225(1). P. 1–11.
14. Potvin J.-Y., Xua Y., Benyahia I. Vehicle routing and scheduling with dynamic travel times. *Computers & Operations Research*. 2009. No. 33. P. 1129–1137. doi:10.1016/j.cor.2004.09.015.
15. Psaraftis H. N. Ship routing and scheduling: the cart before the horse conjecture. *Maritime Economics & Logistics*. 2019. 21(1). P. 111–124.
16. Ramamoorthy M., Syrotiuk V. R. Online re-routing for vehicle breakdown in residential waste collection. *2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference*. 2020. P. 1–5.
17. Ritzinger U., Puchinger J., Hartl R. F. A survey on dynamic and stochastic vehicle routing problems. *International Journal of Production Research*. 2016. No. 54(1). P. 215–231.
18. Shramenko N., Muzylyov D., Shramenko V. Methodology of costs assessment for customer transportation service of small perishable cargoes. *International Journal of Business Performance Management*. 2020. No. 21(1-2). P. 132–148.
19. Zhi L., Zhou X., Zhao J. Vehicle Routing for Dynamic Road Network Based on Travel Time Reliability. *IEEE Access*. 2020. No. 8. P. 190596–190604.

Стаття надійшла 01.06.2021