

## ПЕТРІ-ОБ'ЄКТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ МАТЕРІАЛЬНИХ ЗАСОБІВ У ВІЙСЬКОВИХ ПІДРОЗДІЛАХ

Величезні поставки військових ресурсів по всій країні вимагають великих витрат на перевезення. Планування маршрутів перевезень, які б забезпечили вчасну доставку та економію загальних витрат на доставку становить складну задачу для військового логіста. Тому на даний момент існує необхідність у створенні програмного забезпечення для військових логістів, що дозволяло би швидко та ефективно планувати поставки військових ресурсів, які б забезпечували вчасну доставку та економили витрати на перевезення. В статті проведено огляд сучасних методів розв'язання транспортних задач з обмеженим часом. Обґрунтовано актуальність та нерозкритість даної тематики. Для розв'язання задачі обрано генетичний алгоритм, тому що він невразливий до потрапляння у локальний екстремум та виконується за відносно менший час ніж інші алгоритми. Запропоновано нове рішення, що дозволяє зменшити витрати на доставку замовлень у транспортній системі матеріального забезпечення військових підрозділів. В даній статті використовуються мережі Петрі для підготовки моделей систем. Ці моделі використовуються у генетичному алгоритмі для пошуку кращих маршрутів перевезення. Військове устаткування та ресурси для доставки товарів представляються у вигляді „позицій” (ресурсів) мереж Петрі. Зв'язки між військовими складами та частинами представляються у вигляді „переходів” мереж Петрі. Ці переходи мають пріоритет, який буде геном у нашому генетичному алгоритмі. Екземпляр популяції являє собою список пріоритетів для всіх переходів у моделі. Селекція екземплярів популяції здійснюється через порівняння кількості витрат палива та загального часу затримки, що були отримані у результаті моделювання моделі екземпляру. Чим менша витрата палива та загальний час затримки, тим кращий екземпляр. Завдяки деталізації процесів доставки у мережі Петрі можна отримувати кращі маршрути доставки для транспортних засобів.

**Ключові слова:** військова логістика, транспортна задача, генетичний алгоритм, екземпляр популяції, селекція екземплярів популяції, стохастична мережа Петрі, Петрі-об'єктна модель, імітаційне моделювання, алгоритм оптимізації.

**Бовда Э.Н., Стеценко И.В., Бовда В.Э. Петри-объектное моделирование транспортных перевозок материальных средств в воинских подразделениях.** Огромные поставки военных ресурсов по всей стране требуют больших затрат на перевозки. Планирование маршрутов перевозок, которые бы обеспечили своевременную доставку и экономию общих затрат на доставку составляет сложную задачу для военного логиста. Поэтому на данный момент существует необходимость в создании программного обеспечения для военных логистов, что позволяло бы быстро и эффективно планировать поставки военных ресурсов, обеспечивающих своевременную доставку и сэкономили расходы на перевозку. В статье проведен обзор современных методов решения транспортных задач с ограниченным временем. Обоснована актуальность и нераскрытость данной тематике. Для решения задачи избран генетический алгоритм, потому что он неуязвим к попаданию в локальный экстремум и выполняется за относительно меньшее время чем другие алгоритмы. Предложено новое решение, позволяющее сократить расходы на доставку заказов в транспортной системе материального обеспечения воинских подразделений. В данной статье используются сети Петри для подготовки моделей систем. Эти модели используются в генетическом алгоритме для поиска лучших маршрутов перевозки. Военное оборудование и ресурсы для доставки товаров представляются в виде „позиций” (ресурсов) сетей Петри. Связи между военными складами и частями представляются в виде „переходов” сетей Петри. Эти переходы имеют приоритет, который будет геном в нашем генетическом алгоритме. Экземпляр популяции представляет собой список приоритетов для всех переходов в модели. Селекция экземпляров популяции осуществляется через сравнение количества расхода топлива и общего времени задержки, полученные в результате моделирования модели экземпляру. Чем меньше расход топлива и общее время задержки, тем лучше экземпляр. Благодаря детализации процессов доставки в сети Петри можно получать лучшие маршруты доставки для транспортных средств.

**Ключевые слова:** военная логистика, транспортная задача, генетический алгоритм, экземпляр популяции, селекция экземпляров популяции, стохастическая сеть Петри, Петри-объектная модель, имитационное моделирование, алгоритм оптимизации.

**E. Bovda, I. Stetsenko, V. Bovda Petri-object modeling of transportation of material assets in military units.** Huge supplies of military resources across the country require high transportation costs. Planning transportation routes that will ensure timely delivery and save on overall shipping costs is a daunting task for the military logistician. Therefore, there is a need at present for the creation of software for military logistics, which would allow the rapid and efficient planning of deliveries of military resources that would ensure timely delivery and save on transportation costs. The article provides an overview of modern methods of solving limited-time transport problems. The relevance and non-disclosure of this topic is substantiated. A genetic algorithm is chosen to solve the problem because it is vulnerable

to being hit by local extremum and is executed in relatively less time than other algorithms. A new solution is proposed to reduce the cost of delivery of orders in the transport system of material support of military units. This article uses Petri nets to prepare systems models. These models are used in the genetic algorithm to find the best transportation routes. Military equipment and resources for the delivery of goods are presented in the form of "items" (resources) Petri nets. Links between military depots and units are represented by Petri nets as "crossings". These transitions take priority, which will be the genome in our genetic algorithm. A population instance is a list of priorities for all transitions in a model. Selection of population specimens is done by comparing the amount of fuel consumption and the total delay time that were obtained as a result of simulation of the specimen model. The lower the fuel consumption and the total delay time, the better the copy. By detailing the delivery processes on the Petri network, you can get better delivery routes for vehicles.

**Keywords:** military logistics, transport problem, genetic algorithm, population instance, selection of population instances, stochastic Petri net, Petri-object model, simulation, optimization algorithm.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** В даний час проблеми розвитку транспортної інфраструктури, вдосконалення засобів логістики, інтелектуалізація програмних засобів та інформаційних технологій супроводу та підтримки прийняття рішень на транспорті набувають сьогодні першочергового значення [1].

На жаль, існуючі алгоритми автоматизованого планування вантажоперевезень не завжди відповідають сучасним вимогам, або вимагають залучення занадто великих технічних ресурсів. Розробка нових алгоритмів, що враховують новітні досягнення і тенденції розвитку наукової думки може дозволити скоротити час пошуку рішень в задачах великої розмірності, і водночас підвищити якість одержуваних рішень за рахунок розробки нової архітектури пошуку. Об'єктом дослідження є транспортно-логістичні процеси [1], що відбуваються при забезпеченні військових підрозділів.

На рис. 1 зображено приклад ієрархічної транспортної системи перевезень матеріальних засобів у військових підрозділах, на якому зображені різні рівні складів та військові частини, які в свою чергу потребують певних військових ресурсів.

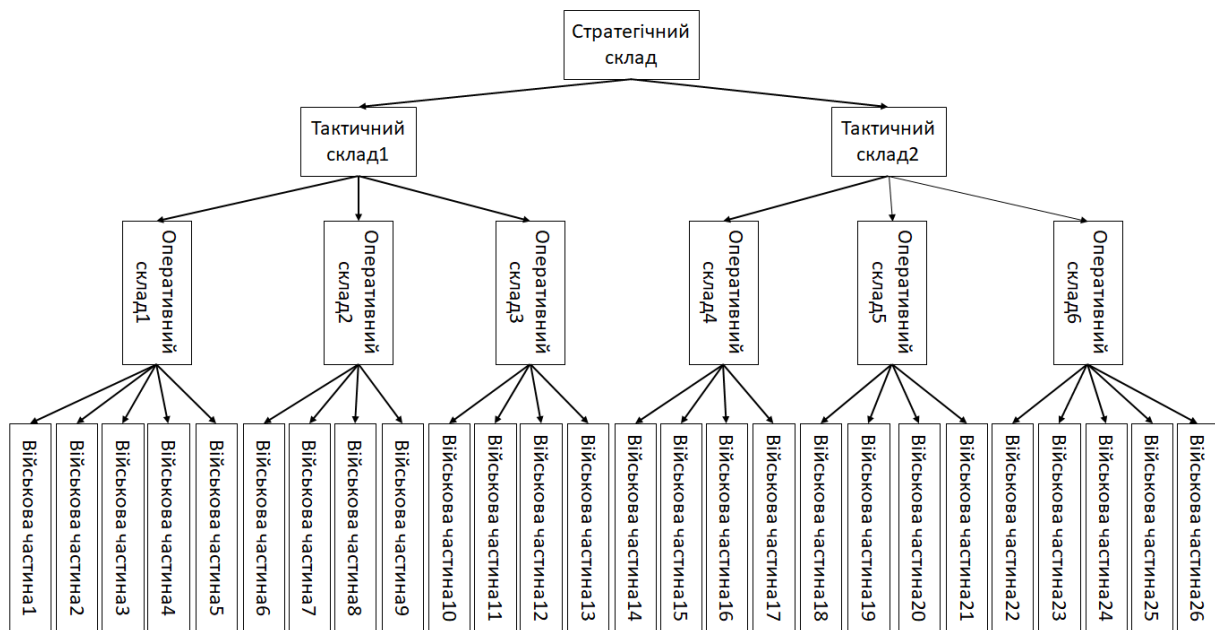


Рис.1 Приклад ієрархічної транспортної системи перевезень матеріальних засобів у військових підрозділах

Кожен склад має в своєму розпорядженні транспортні засоби, які забезпечують перевезення військових ресурсів у менші склади або частини. Кожен транспортний засіб може відвідати один або більше складів (частин). Кожен рівень складів відрізняється обсягом військових ресурсів, які можуть на ньому зберігатися та розміром транспортних засобів. Постає задача у пошуку структури ієрархії складів та множини маршрутів перевезення, які мінімізують сумарний час затримки та витрати палива на доставку до військових частин.

**Аналіз останніх публікацій.** В роботі [1] описано модифікований генетичний алгоритм рішення транспортних задач з обмеженням в часі. В даному алгоритмі геном є згенерований маршрут транспортного засобу, а особиною є набір маршрутів транспортних засобів. Проведені обчислювальні експерименти показали, що розроблений гібридний алгоритм дає рішення з точки зору балансу між кількістю транспортних засобів і довжиною пройденого шляху, однак відсутня оцінка вчасності доставки замовлень. Також недоліком є те, що при генерації екземпляру в генетичному алгоритмі доводиться перевіряти маршрути на коректність, на що при великих обсягах даних витрачається багато часу.

В роботі [2] розглядається оптимізаційна задача складання розкладу і маршрутів руху обслуговуючих бригад. Для вирішення даного типу задач пропонується матричний алгоритм рою частинок. В даному методі генеруються маршрути для кожної бригади. Точки маршруту сортуються у порядку значущості бригади до клієнта для кожного бригади. Набір маршрутів бригад є екземпляром в алгоритмі рою, який можна оцінити за показниками вчасного задоволення потреб клієнтів. В ході ітерацій частини маршрутів змінюються. Екземпляри, які найбільше задовольняють потреби клієнтів змінюються менше. Алгоритм рою частинок є метаевристичним, він дозволяє отримувати безліч допустимих рішень, однак час генерації одного екземпляру популяції є великим. Також результат обчислень алгоритму залежить від початкових параметрів, що може призвести до тривалого пошуку рішення.

В роботі [3] описано гібридний локальний пошук для завдання маршрутизації транспортних засобів з розподіленими поставками, гібридний алгоритм локального пошуку для завдання маршрутизації транспорту різної вантажопідйомності обмеженого автопарку, трьохфазний алгоритм оптимізації автопарку і маршрутизації транспортних засобів. В основу даних алгоритмів покладено зміну точок маршрутів та розбиття одного замовлення на декілька. Дані методи є не ефективними на великих обсягах даних та потребують багато часу на перевірку коректності маршрутів перевезення.

В роботі [4] визначені підходи до моделювання бізнес-процесів: функціональне, об'єктно-орієнтоване та імітаційне моделювання.

Імітаційне моделювання дозволяє відтворювати функціонування бізнес-процесу з урахуванням графіків робочого часу та наявності необхідної кількості ресурсів, що надає можливість аналізувати особливості виконання бізнес-процесів в умовах невизначеності внутрішнього та зовнішнього середовища, а також оцінювати реальний час їх виконання.

В роботі [5] представлено ідею присвоєння ваги переходу, який буде використовуватися для зміни ймовірності виникнення паралельного переходу. Більш висока вага збільшує ймовірність стрільби, коли виникає невизначена ситуація.

В роботі [6] розглянуто моделювання та аналіз комп'ютерної мережі з використанням об'єктно-орієнтованої мережі Петрі. Мережа Петрі є систематичною графічною мовою з потужною функцією для опису і аналізу складних систем, що вимагають високу ступінь деталізації роботи системи. За допомогою математичного розвитку методів та прийомів аналізу мережа Петрі може використовуватись як для статичного структурного аналізу, так і для динамічного аналізу поведінки моделі.

Технологія моделювання мережі Петрі може бути використана для імітації систем з функціями одночасності, асинхронності, розподілу та невизначеного паралелізму. Мережа Петрі стала найперспективнішим інструментом моделювання.

В роботі [7] описано доцільність динамічного розподілу ресурсів підприємства в залежності від зовнішніх умов. В умовах, коли ціна використання ресурсів висока, а інтенсивність робіт невисока, статичний розподіл ресурсів є економічно необґрунтованим. Петрі-об'єктний підхід надає можливість моделювати проходження різних типів об'єктів через ресурси підприємства та враховувати при цьому не тільки час обробки, але й специфічні особливості використання ресурсів такі, як відмови обладнання, витрати палива, часткове зайняття ресурсу, одночасне використання ресурсів об'єктами різних типів.

Це надає можливість формувати з ресурсів групи ресурсів, необхідних для виконання чергового завдання, з урахуванням витрат на їх транспортування до місця роботи. Після

визначення групи ресурсів відбувається переміщення ресурсів у місце виконання роботи та поєднання динаміки відповідних об'єктів.

В роботі [8] запропоновано технологію використання програмного забезпечення Петрі-об'єктного моделювання систем для дослідження дискретно-подійних систем. Технологія ґрунтується на формалізованому описі динаміки функціонування елементів системи стохастичною мережею Петрі з багатоканальними переходами. Програмне забезпечення подано java-бібліотекою класів.

Технологія Петрі-об'єктного моделювання, на відміну від інших технологій моделювання дискретно-подійних систем, поєднує в собі переваги аналітичного та імітаційного методів, надає можливість візуального програмування динаміки складних систем, забезпечує коректність алгоритму імітації та його швидкодію для моделей з великою кількістю елементів. Модель дискретно-подійної системи формується на основі використання стохастичної мережі Петрі для опису динаміки структурних елементів системи та об'єктно-орієнтованого підходу для опису структури системи.

Поєднання нового формалізму з відповідним програмним забезпеченням створює технологію Петрі-об'єктного моделювання систем, що дозволяє: складати формальний опис динаміки дискретно-подійної системи на основі динаміки її елементів; створювати класи типових елементів зі схожою динамікою; розробляти структуру системи на основі множини конструктивних елементів та взаємозв'язках між ними; використовувати уніфікований опис динаміки як елементів, так і об'єктів управління; здійснювати перехід до більш високого рівня програмування моделі: від програмування елементів моделі до конструкції моделі, від програмування подій до конструювання динаміки системи з використанням мереж Петрі.

В роботі [9] описано бібліотеку Java-класів графічного модуля програмного забезпечення Петрі-об'єктної технології моделювання систем Stochastic Petri Net Simulator, використання якого забезпечує візуальне сприйняття мереж Петрі-об'єктів моделі та спрощує побудову та відлагодження динаміки функціонування Петрі-об'єктів.

В роботі [10] представлено інтелектуальний компонент візуального програмування стохастичних мереж Петрі, що являє собою вдосконалену версію однієї з бібліотек Java-класів програмного засобу Петрі-об'єктного моделювання дискретно-подійних систем. Цей компонент призначений для збереження моделей, побудованих за допомогою маніпулювання графічними об'єктами, у вигляді програмного коду мовою Java, а також відновлення візуальних моделей з програмного коду.

Інтелектуальний компонент планується використовувати під час розроблення іншого компонента програмного забезпечення Петрі-об'єктного моделювання, який дозволив би створювати візуальними засобами моделі систем вищого рівня та імітувати їхнє функціонування.

Під моделями систем вищого рівня маються на увазі такі моделі, що складаються із великої кількості мереж Петрі.

Також розроблений компонент може безпосередньо слугувати для швидкої побудови і модифікації простих стохастичних мереж Петрі, а також їхнього тиражування.

Зручність у використанні компонента та відсутність необхідності знати мову Java роблять можливою роботу з імітаційними моделями користувачів, які не розуміються на розробці програмного забезпечення, а володіють лише базовими знаннями в галузі моделювання за допомогою мереж Петрі.

В роботі [11] представлено приклади моделювання систем вкладеними мережами Петрі. Цей підхід також орієнтований на поєднання фрагментів мереж Петрі в одну модель, проте суттєво відрізняється від Петрі-об'єктного підходу, оскільки не надає мережі Петрі властивостей об'єкта в термінах об'єктно-орієнтованої технології, і тому не надає можливості тиражування мереж Петрі з заданими властивостями, що суттєво впливає на швидкість розробки моделі та на швидкість імітації.

В роботі [12] представлено Ієрархічний симулятор Петрі, інструмент дизайну мережі Петрі та міжпроцесорний канал зв'язку.

Ієрархічний симулятор Петрі підтримує ієрархічне моделювання та може аналізувати динамічні та структурні властивості мережі Петрі шляхом генерування просторів стану. Описано алгоритм, який генерує простір станів шляхом багатопотокової передачі.

Використовуючи напрацювання вище наведених робіт необхідно створити Петрі-об'єктну модель транспортних перевезень матеріальних засобів у військових підрозділах, оскільки він вимагає певної специфікації для матеріального забезпечення військових підрозділів.

**Метою статті** є розробка Петрі-об'єктної моделі транспортних перевезень матеріальних засобів у військових підрозділах.

**Виклад основного матеріалу.** Військове устаткування та ресурси (транспортні засоби) для доставки товарів представляються у вигляді позицій мереж Петрі.

Шляхи між військовими складами та частинами представляються у вигляді переходів мереж Петрі. Ці переходи мають пріоритет, який буде генетом у генетичному алгоритмі.

Найменша мережа Петрі представляє собою транспортний засіб, який рухається між пунктами призначення, які потребують певного військового устаткування.

Транспортний засіб рухається між пунктами в залежності від пріоритетів переходів і доставляє військове устаткування у ці пункти.

Оскільки транспортний засіб має обмежену вантажопідйомність та обмеження на одне пересування з кожної пари пунктів, то врешті-решт транспортний засіб повернеться на базу для завантаження нових замовлень. Кожен склад може мати в своєму розпорядженні декілька транспортних засобів, а значить, мережі Петрі транспортних засобів мають спільне військове устаткування для виконання замовлень. На рисунку 2 зображено приклад фрагменту мережі Петрі для транспортного засобу доставки замовлень для військової частини. Дуги різного кольору використовуються на рисунку лише з метою кращого сприйняття взаємозв'язків елементів мережі Петрі.

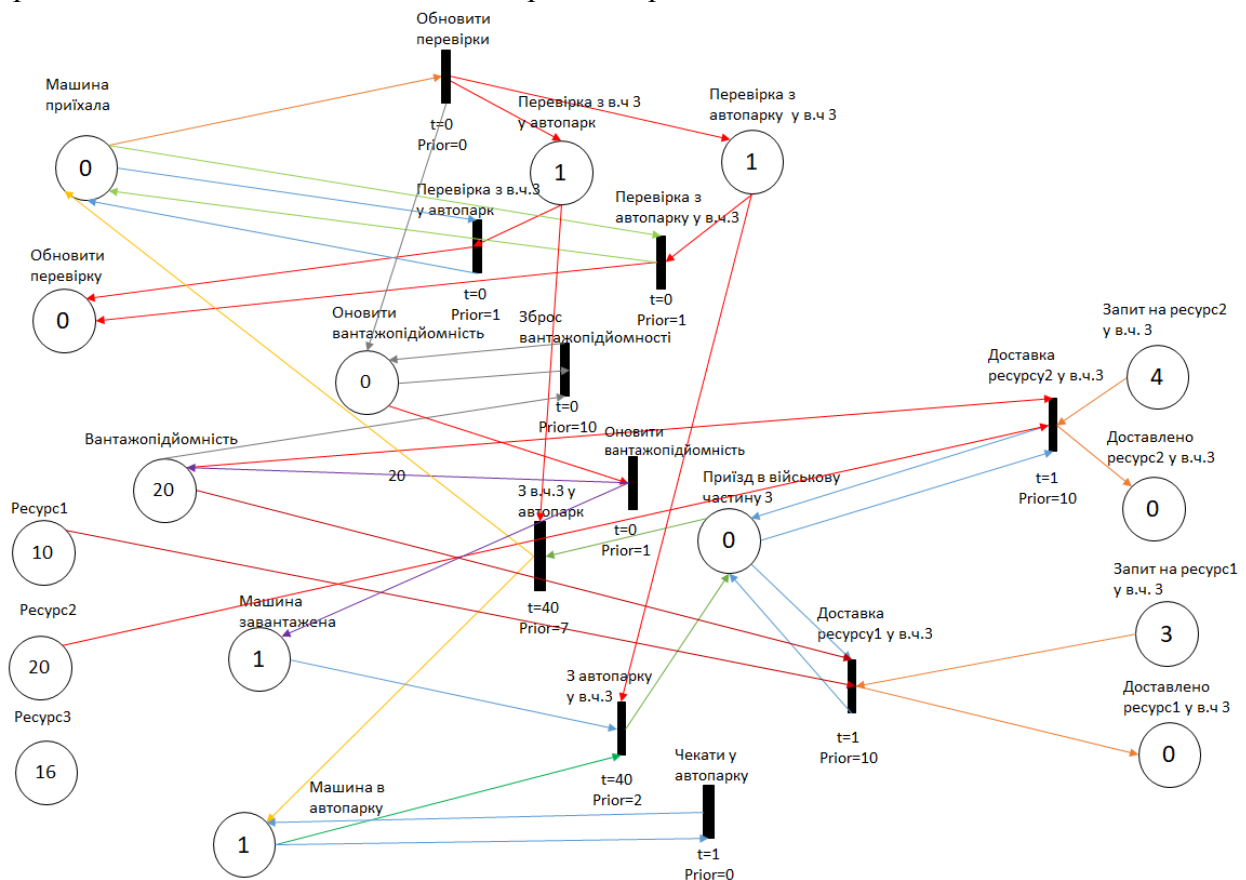


Рис. 2 Приклад фрагменту мережі Петрі для транспортного засобу доставки замовлень для військової частини



Моделювання починається з переходу „3 автопарку у в.ч.3 (військова частина)”, забираючи маркери у позицій „Машина в автопарку” та „Машина завантажена”. Далі маркер переходить у позицію „Приїзд в військову частину3”. Оскільки пріоритети „Доставка ресурсу 2 у в.ч.3” та „Доставка ресурсу 1 у в.ч.3” більші ніж перехід „3 в.ч.3 у автопарк”, то вони виконуються першими, тип самим моделюючи доставку ресурсу 1 та ресурсу 2 у військову частину 3. Після здійснення доставки ресурсів маркер з позиції „Приїзд в військову частину3” переходить у перехід „3 в.ч. 3 у автопарк”. Потім з переходу „3 в.ч. 3 у автопарк” маркери переходять у позиції „Машина в автопарку” та „Машина приїхала”. Далі спрацьовують усі переходи, які починаються на слово „Перевірка”.

Позиції “Перевірка з в.ч.3 у автопарк” та „Перевірка з автопарку у в.ч.3” створені для того, щоб запобігти циклам у маршрутах перевезення військового устаткування, оскільки пріоритети переходів між військовими частинами та автопарком на початку моделювання визначаються випадковим чином.

Далі спрацьовує перехід “Обновити перевірки”, що передає маркери у всі позиції „Перевірки” та позицію “Обновити вантажопідйомність”. Перехід „Зброс вантажопідйомності” дозволяє обнулити невикористану перехід „Вантажопідйомність”, яка можливо не була використана у ході перевезень.

Потім спрацьовує перехід „Обновити вантажопідйомність”, після спрацювання якого 20 маркерів переходять у позицію „Вантажопідйомність”, а 1 маркер у позицію „Машина завантажена”.

Таким чином ми повернулися у початкове положення.

Також у схемі присутній перехід „Чекати у автопарку”. Цей перехід має пріоритет 0. За допомогою програмних засобів, якщо всі замовлення виконані або на складі закінчилися необхідні ресурси, то переходу „Чекати у автопарку” присвоюється пріоритет 100, що унеможливує недоцільні пересування транспортного засобу по військовим частинам.

Якщо у позиціях „Ресурси” з’являються маркери, то переходу „Чекати у автопарку” знову присвоюється пріоритет 0 і транспортні засоби можуть знову розвозити замовлення.

На рисунку 3 зображено приклад транспортних сполучень між автопарком та військовими частинами, на якому вказано час на дорогу між ними. А на рисунку 4 це представлено мережею Петрі.

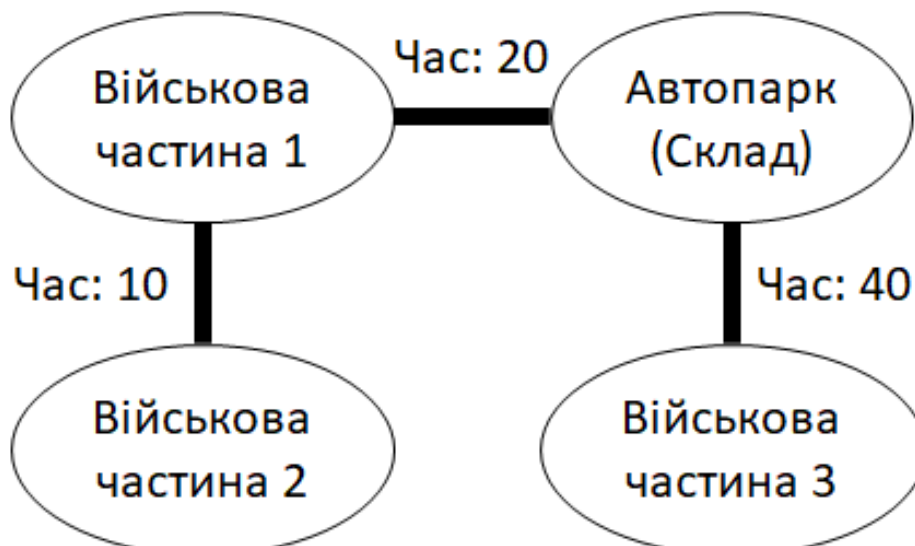


Рис. 3 Приклад транспортних сполучень між автопарком та військовими частинами

Дуги різного кольору використовуються на рисунку лише з метою кращого сприйняття взаємозв'язків елементів мережі Петрі. Фрагмент з перевірки на цикли та оновлення вантажопідйомності опущено.

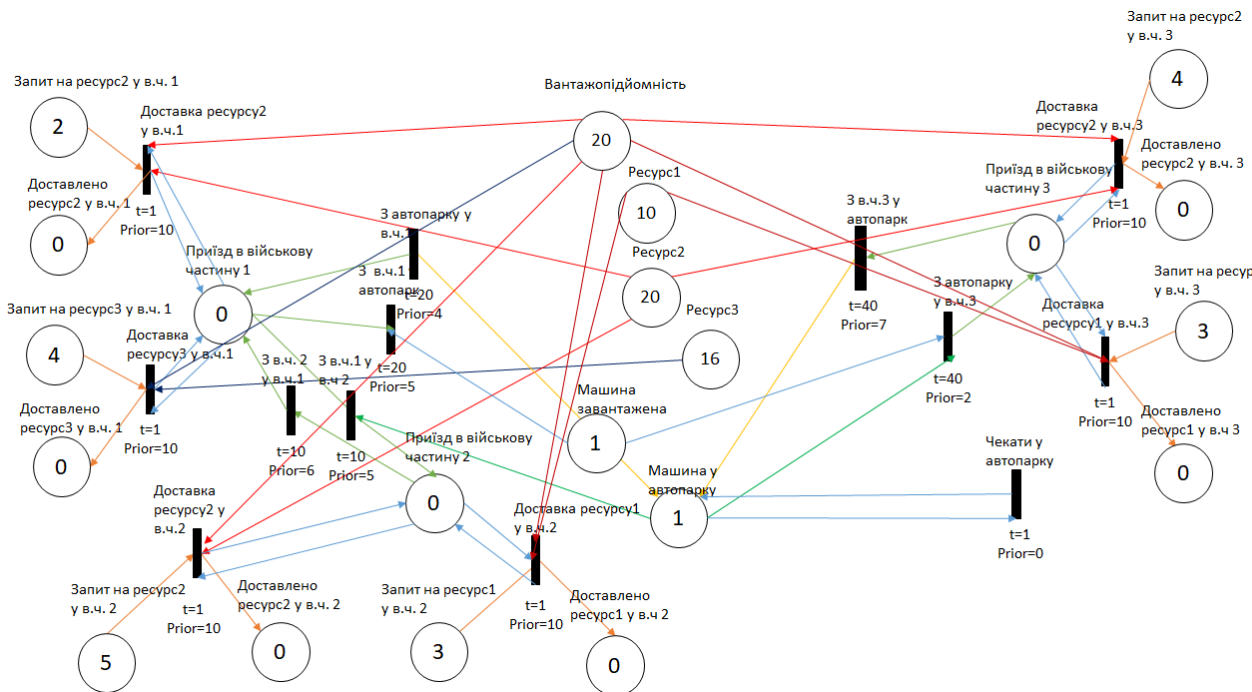


Рис. 4 Представлення мережею Петрі транспортних сполучень між автопарком та військовими частинами

Таким чином представлено мережу Петрі для одного транспортного засобу. Однак автопарк може мати у своєму розпорядженні безліч машин. Тоді необхідно визначити усі позиції „Ресурс”, „Запит на ресурс” та „Доставлено ресурс у в.ч.” як спільні для всіх транспортних засобів, які належать одному автопарку (складу).

Для реалізації більш вищих рівнів доставки, де автопарк тактичного складу розвозить ресурси у оперативні склади та автопарк стратегічного складу розвозить ресурси у тактичні склади використовується аналогічна схема.

Для пошуку кращого рішення застосовується генетичний алгоритм, де в процесі моделювання отримаємо кращі рішення, які представляють собою необхідну кількість машин у кожному складі та маршрути розвезення військового устаткування для кожної машини.

Екземпляр популяції являє собою кількість машин у кожному складі та масив пріоритетів для всіх переходів у моделі.

Селекція екземплярів популяції здійснюється через порівняння кількості витрат палива та загального часу затримки, що були отримані у результаті моделювання моделі екземпляру.

Чим менші витрати палива та загальний час затримки, тим кращий екземпляр.

**Представимо формалізовану постановку та рішення завдання.** Дано:  $B1$  – кількість оперативних складів;  $B2$  – кількість тактичних складів;  $B3$  – кількість стратегічних складів;  $B4$  – кількість військових частин;  $G$  – список зв'язків між складами різних рівнів та військовими частинами;  $N1_i$  – кількість замовлень для оперативних складів  $i = \overline{1, B1}$ ;  $N2_i$  – кількість замовлень для тактичних складів  $i = \overline{1, B2}$ ;  $N3_i$  – кількість замовлень для стратегічних складів  $i = \overline{1, B3}$ ;  $N4_i$  – кількість замовлень для військових частин  $i = \overline{1, B4}$ ;  $M1_i$  – кількість маршрутів для  $i$ -ого оперативного складу  $i = \overline{1, B1}$ ;  $M2_i$  – кількість маршрутів для  $i$ -ого тактичного складу  $i = \overline{1, B2}$ ;  $M3_i$  – кількість маршрутів для  $i$ -ого стратегічного складу  $i = \overline{1, B3}$ ;  $E1_i$  – кількість транспортних засобів для  $i$ -ого оперативного складу  $i = \overline{1, B0}$ ;  $E2_i$  – кількість транспортних засобів для  $i$ -ого тактичного складу  $i = \overline{1, B2}$ ;  $E3_i$  – кількість транспортних засобів для  $i$ -ого стратегічного складу  $i = \overline{1, B3}$ ;  $C1_{ij}$  – вміст  $i$ -ої машини по вазі для  $j$ -ого оперативного складу,  $i = \overline{1, E1}$ ;  $j = \overline{1, B1}$ ;  $C2_{ij}$  – вміст  $i$ -ої машини по вазі для  $j$ -ого оперативного складу,  $i = \overline{1, E2}$ ;  $j = \overline{1, B2}$ ;  $C3_{ij}$  – вміст  $i$ -ої машини по вазі для  $j$ -ого

оперативного складу,  $i = \overline{1, E3}$ ;  $j = \overline{1, B3}$ ;  $W1_{ij}$  – загальна вага  $i$ -ого замовлення для  $j$ -ого оперативного складу,  $i = \overline{1, N1}$   $j = \overline{1, B1}$ ;  $W2_{ij}$  – загальна вага  $i$ -ого замовлення для  $j$ -ого тактичного складу,  $i = \overline{1, N2}$   $j = \overline{1, B_t}$ ;  $W3_{ij}$  – загальна вага  $i$ -ого замовлення для  $j$ -ого стратегічного складу,  $i = \overline{1, N3}$   $j = \overline{1, B3}$ ;  $O1_{ji}$  – кількість замовлень для  $i$ -ого маршруту,  $j$ -ого оперативного складу  $j = \overline{1, B1}$ ;  $i = \overline{1, M1}$ ;  $O2_{ji}$  – кількість замовлень для  $i$ -ого маршруту,

$j$ -ого тактичного складу  $j = \overline{1, B2}$ ;  $i = \overline{1, M2}$ ;  $O3_{ji}$  – кількість замовлень для  $i$ -ого маршруту,  $j$ -ого стратегічного складу  $j = \overline{1, B3}$ ;  $i = \overline{1, M3}$ ;  $O4_{ji}$  – кількість замовлень для  $i$ -ого маршруту,  $j$ -ого стратегічного складу  $j = \overline{1, B4}$ ;  $i = \overline{1, M4}$ ;  $t_i$  – директивний час доставки  $i$ -ого замовлення,  $i = \overline{1, N4}$ ;  $T_i$  – фактичний час доставки  $i$ -ого замовлення,  $i = \overline{1, N4}$ ;  $k_i$  – пройдений шлях  $i$ -ого маршруту,  $i = \overline{1, (M1 + M2 + M3)}$ ;  $\alpha$  – коефіцієнт важливості витрат палива;

$(1 - \alpha)$  – коефіцієнт важливості вчасної доставки замовлень;  $z_i$  – час затримки  $i$ -ого замовлення,  $i = \overline{1, N4}$  (Якщо  $t_i \geq T_i$ , то  $z_i = 0$ , інакше  $z_i = T_i - t_i$ ).

*Обмеження:*

$$0 \leq \alpha \leq 1.$$

$$\sum_{i=1}^{N1} W1_i \leq C_{o_i}, \quad j = \overline{1, B1} \text{ - обмеження для замовлень оперативних складів.}$$

$$\sum_{i=1}^{N2} W2_i \leq C_{t_i}, \quad j = \overline{1, B2} \text{ - обмеження для замовлень тактичних складів.}$$

$$\sum_{i=1}^{N3} W3_i \leq C_{s_i}, \quad j = \overline{1, B3} \text{ - обмеження для замовлень стратегічних складів.}$$

$M1_i \geq E1_i$   $i = \overline{1, B1}$  – кількість маршрутів для оперативних складів може бути більшою за кількість доступних транспортних засобів.

$M2_i \geq E2_i$   $i = \overline{1, B2}$ ; – кількість маршрутів для тактичних складів може бути більшою за кількість доступних транспортних засобів.

$M3_i \geq E3_i$   $i = \overline{1, B3}$  – кількість маршрутів для стратегічних складів може бути більшою за кількість доступних транспортних засобів.

Тоді цільова функція рішення задачі транспортних перевезень матеріальних засобів у військових підрозділах буде виглядати таким чином:

$$(1 - \alpha) \sum_{i=1}^n z_i + \alpha \sum_{i=1}^m k_i \rightarrow \min \quad (1)$$

Цільова функція моделювання цієї задачі можна представити в формальному вигляді:

$$Y = F(X, P) \quad (2)$$

де  $Y \rightarrow \min$ , є цільовою функцією;

$F$  – алгоритм імітації;

$X$  – змінні моделі:

$X = (T, W1, W2, W3, N1, N2, N3, M1, M2, M3, O1, O2, O3, O4)$ ;

$P$  – вхідні параметри:

$P = (t, B1, B2, B3, B4, N4, G, \alpha, C1, C2, C3, E1, E2, E3)$ .

Тоді алгоритм оптимізації рішення транспортної задачі з використанням мереж Петрі буде виглядати наступним чином:

1. Введення географічних координат військових складів та військових частин.
2. Введення військового устаткування для військових складів.
3. Введення доступного автопарку для всіх військових складів.
4. Введення дорожніх сполучень між військовими складами та військовими частинами.
5. Введення запитів на військове устаткування для військових частин.
6. Введення глибини генетичного алгоритму ( $N$ ) ( $N > 1$ ).



7. Введення критерію зупинки генетичного алгоритму  $e$  ( $e > 0$ ) (доступної різниці між значенням цільової функції найкращих представників попереднього та поточного покоління).
8. Введення початкової кількості популяції для генетичного алгоритму( $P$ ) ( $P > 0$ ;  $P \% 2 = 0$ ).
9. Генерація вхідних параметрів початкової популяції готових рішень ( $P$ ).
10. Створення моделей екземплярів початкової популяції транспортних перевезень матеріальних засобів у військових підрозділах з використанням мереж Петрі.
11. Моделювання екземплярів початкової популяції транспортних перевезень матеріальних засобів у військових підрозділах.
12. Вибір кращих  $P/2$  екземплярів популяції.
13. Схрещування кращих екземплярів і генерація нової популяції у кількості  $P$ .
14. Мутація деяких екземплярів нової популяції.
15. Створення моделей екземплярів нової популяції транспортних перевезень матеріальних засобів у військових підрозділах з використанням мереж Петрі.
16. Моделювання екземплярів нової популяції транспортних перевезень матеріальних засобів у військових підрозділах.
17. Отримати значення цільової функції найкращого екземпляру нової популяції  $b_i$ , де  $i = \overline{0, N}$  – номер популяції, а  $b_0 = 0$
18. Зменшення глибини генетичного алгоритму на один крок ( $N --$ ).
19. Якщо  $N > 0$  та  $b_i - b_{i-1} > e$ , то повернутися до кроку 12, якщо ні, то крок 20.
20. Вивести найкращий екземпляр популяції.

**Висновок.** Проведено аналіз існуючих методів та алгоритмів рішення подібних задач. Сформульована математична постановка транспортної задачі з обмеженим часом, в якій визначені обмеження моделі.

Створено Петрі-об'єктну модель транспортних перевезень матеріальних засобів у військових підрозділах. В якості цільової функції вибрано суму витрат пального та сумарну затримку доставок замовлень.

Описано алгоритм оптимізації рішення транспортної задачі, який дозволяє зменшити загальний час затримки доставки військового устаткування та зменшити витрати пального. Дана модель дозволяє використовувати різні ресурси військового устаткування та додавати нові ресурси за потреби.

Також дана модель дозволяє проводити налаштування вантажопідйомності для кожного транспортного засобу.

Перевагою моделі є її стохастичність, що дозволяє моделювати невизначені процеси, що в свою чергу наближає моделювання транспортних перевезень матеріальних засобів до реальних значень.

Деталізація процесів дозволяє проводити більш адекватне відображення станів та дій, які відбуваються у реальній системі.

Використання генетичного алгоритму дає необхідну кількість транспортних засобів та їх вантажопідйомність для кожного складу та кращі маршрути, які зменшують час запізнення замовлень та загальні витрати пального на доставку.

Модель дозволяє проводити моделювання транспортних перевезень у складних багаторівневих ієрархічних системах.

Подальші дослідження будуть спрямовані на пошук оптимальної кількості транспортних засобів для кожного автопарку різних рівнів складів з урахуванням мінімізації часу затримки та пального.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гладков Л.А. Гибридный алгоритм решения транспортных задач с ограничением по времени / Л.А. Гладков, Н.В. Гладкова. – Таганрог: Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. – С. 180-191.
2. Филиппова А.С. Матричный алгоритм роя частиц для поддержки принятия решений при составлении расписания обслуживающих бригад / А.С. Филиппова, Е.В. Андреева, Э.И. Дямина, Е.Д. Лаптенко. – Труды Шестой всероссийской научной конференции „Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений”, 28 – 31 мая, Уфа-Ставрополь, Россия, 2018. – С. 126 – 128.
3. Хмелев А.В. Алгоритмы локального поиска для задач маршрутизации транспортных средств / А.В. Хмелев, Ю.А. Кочетов – Новосибирск: Новосибирский государственный университет 2015.
4. Корзаченко О.В. Моделювання бізнес-процесів підприємств: методології, підходи та методи / О.В. Корзаченко – Херсон: Науковий вісник Херсонського державного університету. С. 171 – 175.
5. Kucharik M. Modeling of Uncertainty with Petri Nets / M.Kucharik, Z. Balogh – Tr. A. Hlinku 1, 949 74 Nitra, Slovakia.
6. Xinhua C. Computer Network Simulation Modeling Based / C. Xinhua, S. Ya-ni – Sichuan Information Technology College, China iJOE 2016, С. 25 – 28.
7. Стеценко І. В. Петрі-об’єктний підхід до побудови моделей динамічного розподілу ресурсів підприємства / І.В. Стеценко – Чернівці: Буковинський державний фінансово-економічний університет, Україна, 2014, С.132 – 134.
8. Стеценко І. В. Дослідження дискретно-подійних систем з використанням технології Петрі-об’єктного моделювання / І.В. Стеценко – Чернівці: УСиМ, 2014, № 5 С. 77 – 85.
9. Стеценко І.В. Проектування графічного модуля програмного забезпечення Петрі-об’єктного моделювання систем / І.В. Стеценко, О.В. Василевська – Черкаси: Вісник ЧДТУ, 2013 №2, С. 13 – 18.
10. Стеценко І. В. Інтелектуальний компонент візуального програмування стохастичних мереж Петрі / І.В. Стеценко, К.С. Лещенко – Чернівці: Технічні науки та технології №4(6) 2016 С. 139 – 147.
11. Ломазова И.А. Вложенные сети Петри: моделирование и анализ распределенных систем с объектной структурой / И.А. Ломазова – Росія, Москва: Научный мир. 2004. – С. 54 – 107.
12. Harie Y. Hierarchical Petri Net Simulator: Simulation, Design Validation, and Model Checking Tool for Hierarchical Place/Transition Petri Nets / Y. Harie, K. Wasaki – Interdisciplinary Graduate School of Science and Technology, Shinshu University, Wakasato, Nagano, Nagano, Japan: SIMULTECH 2017, С. 356 – 361.