

СИСТЕМА МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ МАТЕРІАЛЬНИХ ЗАСОБІВ У ВІЙСЬКОВИХ ПІДРОЗДІЛАХ

Всебічне і безперервне тилове забезпечення військ і сил (логістика) в більшості країн НАТО та в цілому світі вважається одним з основних факторів успішного ведення бойових дій. Важливість системи тилового забезпечення є загально визнаною, і в сучасних умовах, на думку західних фахівців, вона набуває ще більшого значення. Тилове забезпечення включає в себе організацію і здійснення заходів тилу з підтримки в боєздатному стані військових сил, забезпечення їх усіма видами матеріальних засобів і створення умов для виконання поставлених перед ними завдань. На сьогодні військовим логістам необхідно розробляти маршрути перевезень військових ресурсів, що становить складну задачу. 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. Використання великої кількості різновиду військових ресурсів, транспортних засобів різної розмірності та ієрархічна специфіка структури управління військовими складами спонукає розробити новий алгоритм, який би оптимізував маршрути перевезень та забезпечував вчасну доставку військових ресурсів. В статті проведено огляд сучасних методів розв'язання транспортних задач з обмеженим часом. Кожен з цих методів використовується для рішення вузькоспеціалізованих задач зі своїми обмеженнями, що не дозволяє отримати рішення задач для ієрархічних структур складів. Проведено аналіз існуючих підходів моделювання подібного роду завдань, де знайшло широке використання імітаційне моделювання, що використовує мережі Петрі. Обґрунтовано актуальність та нерозкритість даної тематики. Запропоновано нове рішення – комбінуння генетичного алгоритму та імітаційного моделювання з використанням мереж Петрі, що дозволяє зменшити витрати на доставку замовлень у системі матеріального забезпечення військових підрозділів. Описано переваги використання генетичного алгоритму та мереж Петрі. Моделювання транспортних перевезень матеріальних засобів було здійснено на мові програмування Java в інтегрованому середовищі розробки програмного забезпечення IntelliJ IDEA. Представлено результати моделювання, які представляють собою необхідну кількість транспортних засобів для кожного складу та їх маршрути для розвезення матеріальних засобів у військових підрозділах, де враховуються різні коефіцієнти важливості економії палива та вчасної доставки замовлень. Аналіз результатів дає підставу стверджувати, що цільова функція рішення задачі покращується при більшій початковій популяції та більшій кількості ітерацій генетичного алгоритму. Деталізація процесів дозволяє проводити більш інформативне відображення станів та дій, які відбуваються у реальній системі. Модель дозволяє проводити моделювання транспортних перевезень у складних багаторівневих ієрархічних системах.

Бовда Э.Н., Стеценко И.В., Бовда В.Э. Система моделирования транспортных перевозок материальных средств в воинских подразделениях. Всестороннее и бесперебойное тыловое обеспечение войск и сил (логистика) в большинстве стран НАТО и во всем мире считается одним из основных факторов успешного ведения боевых действий. Важность системы тылового обеспечения является общепризнанной, и в современных условиях, по мнению западных специалистов, она приобретает еще большее значение. Тыловое обеспечение включает в себя организацию и осуществление мероприятий тыла по поддержанию в боеспособном состоянии военных сил, обеспечение их всеми видами материальных средств и создание условий для выполнения поставленных перед ними задач. На сегодня военным логистам необходимо разрабатывать маршруты перевозок военных ресурсов, составляет сложную задачу. 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. Использование большого количества разнообразности военных ресурсов, транспортных средств различной размерности и иерархическая специфика структуры управления военными складами побуждает разработать новый алгоритм, который бы оптимизировал маршруты перевозок и обеспечивал своевременную доставку военных ресурсов. В статье проведен обзор современных методов решения транспортных задач с ограниченным временем. Каждый из этих методов используется для решения узкоспециализированных задач со своими ограничениями, не позволяет получить решение задач для иерархических структур складов. Проведен анализ существующих подходов моделирования подобного рода задач, где нашло широкое применение имитационное моделирование, использующее сети Петри. Обоснована актуальность и нераскрытость данной тематике. Предложено новое решение - комбинирование генетического алгоритма и имитационного моделирования с использованием сетей Петри, что позволяет уменьшить затраты на доставку заказов в системе материального обеспечения воинских подразделений. Описаны преимущества использования генетического алгоритма и сетей Петри. Моделирование транспортных перевозок материальных средств было осуществлено на языке программирования Java в

интегрированной среде разработки программного обеспечения IntelliJ IDEA. Представлены результаты моделирования, которые представляют собой необходимое количество транспортных средств для каждого состава и их маршруты для развозки материальных средств в воинских подразделениях, где учитываются различные коэффициенты важности экономии топлива и своевременной доставки заказов. Анализ результатов дает основание утверждать, что целевая функция решения задачи улучшается при большей начальной популяции и большем количестве итераций генетического алгоритма. Детализация процессов позволяет проводить более информативное отображение состояний и действий, которые происходят в реальной системе. Модель позволяет проводить моделирование транспортных перевозок в сложных многоуровневых иерархических системах.

E. Bovda, I. Stetsenko, V. Bovda *The system is the modeling of transportation of material assets in military units. Comprehensive and uninterrupted logistics support for troops and forces (logistics) in most NATO countries and around the world is considered to be one of the key factors for successful combat operations. The importance of the logistics system is universally recognized, and in the current context, according to Western experts, it is even more important. Logistic support includes the organization and implementation of rear activities to support the combat-able state of the military, providing them with all kinds of material resources and creating the conditions for them to fulfill their tasks. Today, military logisticians need to develop routes of transportation of military resources, which is a difficult task. 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 use of a large variety of military resources, vehicles of various dimensions and the hierarchical specifics of the structure of military warehouse management leads to the development of a new algorithm that would optimize transportation routes and ensure timely delivery of military resources. The article provides an overview of modern methods of solving limited-time transport problems. Each of these methods is used to solve highly specialized problems with their limitations, which makes it impossible to obtain a solution of problems for hierarchical structures of structures. An analysis of existing modeling approaches of this kind has been carried out, where simulation modeling using Petri nets has been widely used. The relevance and non-disclosure of this topic is substantiated. A new solution is proposed - a combination of genetic algorithm and simulation using Petri nets, which reduces the cost of delivering orders in the material support system of military units. The advantages of using genetic algorithm and Petri nets are described. The modeling of material transportation was carried out in Java programming language in the IntelliJ IDEA integrated software development environment. The simulation results are presented, which represent the required number of vehicles for each warehouse and their routes for material transportation in military units, taking into account different factors of importance of fuel economy and timely delivery of orders. Analysis of the results suggests that the objective function of the solution of the problem is improved with a larger initial population and more iterations of the genetic algorithm. The detailing of the processes allows for a more informative reflection of the states and actions occurring in the real system. The model allows modeling of transportation in complex multilevel hierarchical systems.*

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

Постановка проблеми в загальному вигляді. На даний момент існує необхідність у створенні програмного забезпечення для військових логістів, що дозволяло б ефективно управляти військовими ресурсами. Змістовна постановка задачі має наступний вигляд. Військовий логіст наносить на карту військові частини та військові склади трьох рівнів: стратегічний, тактичний, оперативний.

Стратегічні склади є найбільшими складами, вони доставляють ресурси у тактичні склади. Тактичні склади є середніми складами, вони доставляють ресурси у оперативні склади. Оперативні склади є найменшими складами, вони доставляють ресурси у військові частини, які в свою чергу є кінцевими споживачами ресурсів. 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, які доставляють військові ресурси. Постає задача у пошуку необхідної кількості транспортних засобів для кожного складу та множини маршрутів перевезення, які мінімізують сумарний час затримки та витрати палива на доставку до військових частин та складів.

Таким чином вхідними даними для системи моделювання транспортних перевезень матеріальних засобів є: місце розташування військових складів різних рівнів; місце розташування військових частин; військові ресурси (устаткування) різних типів, що зберігаються на складах; кількість транспортних засобів з різними вантажопідйомностями (для кожного рівня складів окремо); замовлення необхідної кількості ресурсів для військових частин; час, що необхідний для переміщення між військовими складами та частинами; кількість ітерацій та початкової популяції для генетичного алгоритму пошуку кращого рішення. Необхідно розрахувати списки маршрутів для виконання військових замовлень, де мінімізується цільова функція, що враховує загальні витрати палива та загальний час затримки замовлень з урахуванням коефіцієнтів їх важливості.

Аналіз останніх публікацій. В роботі [1] представлено аналіз керування транспортними потоками в сучасних умовах. Показані типи розподілених систем. Подається огляд основних методів управління розподіленими транспортними системами транспортних потоків. Детально розкривається завдання управління маршрутизацією транспорту. Показано значення просторової інформації для управління транспортними системами. Дана класифікація задач маршрутизації транспорту.

В роботі [2] розглядається рішення *NP*-повної задачі маршрутизації автотранспорту. Пропонується модифікований генетичний алгоритм для вирішення даного завдання. Основна ідея алгоритму – моделювання природного відбору. Розроблено програмне середовище маршрутизації вантажоперевезень. Експериментальні дослідження довели ефективність модифікованого генетичного алгоритму. «Хороші» рішення знаходиться протягом декількох секунд.

В роботі [3] розглядаються нові підходи до вирішення динамічних транспортних завдань. Такого роду завдання відносяться до класу *NP*-складних задач і для їх ефективного вирішення постійно розробляються й удосконалюються різні методи, засновані на використанні різних евристик. Описані нові підходи до вирішення подібних завдань на основі гібридних інтелектуальних моделей і методів. Наприклад, використання моделі нечіткого логічного контролера для динамічної зміни керуючих параметрів завдання. Представлені моделі вирішення завдань оптимізації на основі ройових методів, в тому числі мурашиних алгоритмів.

В роботі [4] пропонується метод побудови розкладу в завданні транспортної логістики *MDVRPTW* (*Multiple Depot Vehicle Routing Problem with Time Windows*) на основі мультиагентного підходу. Розглядається мультиагентна система взаємодіючих вантажівок, складів і замовлень. Для обмеження інтенсивності переговорів агентів запропонована організація сцени на основі тріангуляції Делоне.

Показано, що рішення мультиагентної системи на 10 – 30% відрізняється від відомих еталонних рішень, однак значно перевищує їх за швидкістю отримання, що дає можливість застосовувати метод в системах реального часу.

В роботі [5] описано переваги об'єднаної логіки імітаційного моделювання, що включає широкий спектр методологій і інструментів, що стикаються на рівні загального погляду і міждисциплінарної термінологічної мови зі стратегічним управлінням, системним аналізом, програмної інженерії. Імітаційне моделювання здатне виступити як головна і найбільш ефективна робоча технологія системного аналізу, що застосовується при вирішенні широкої групи управлінських завдань.

В роботі [6] запропоновано математичну модель для дослідження функціонування інформаційної системи з використанням математичного апарату розширених мереж Петрі. Наведено результати моделювання роботи апаратних ресурсів як дискретної динамічної системи. Отримані результати показали, що розроблена динамічна модель інформаційної системи в термінах мережі Петрі, яка адекватно відображає роботу реальної системи, що дозволяє використовувати її для моделювання процесів в інформаційних системах і визначати раціональне завантаження.

В роботі [7] 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 [8] 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 [9] 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 [10] 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 [11] 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 [12] 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 [13] 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.

В роботі [14] запропоновано підхід *GAPN* (генетичні алгоритми і мережі Петрі), який поєднує в собі потужність моделювання мереж Петрі з можливістю оптимізації генетичних алгоритмів (*GA*) для планування виробничих систем. Цей підхід використовує як мережі Петрі для формулювання завдання планування, так і *GA* для планування. Його основною перевагою є його здатність моделювати широкий спектр виробничих систем без змін ні в структурі мережі, ні в поданні хромосом.

В роботі [15] розглянуто моделювання бізнес-процесів з використанням генетичного алгоритму та мереж Петрі. Моделювання бізнес-процесів (*BPS*) дозволяє проводити детальний аналіз схем розподілу ресурсів до фактичного розгортання і виконання процесів. Хоча *BPS* широко досліджувався в останні роки, менше уваги приділялося інтелектуальній оптимізації розподілу ресурсів в бізнес-процесах за рахунок використання результатів моделювання. Дана робота об'єднує можливості генетичного алгоритму (*GA*) в пошуку оптимальної схеми розподілу ресурсів і переваг симуляції процесу.

Незважаючи на те, що *GA* успішно використовувався для знаходження оптимальних схем розподілу ресурсів у виробничих процесах, в цій попередній роботі розробка цих алгоритмів була спеціальною, що означає, що хромосоми, оператори кросовера і вибору, а також функція придатності повинна бути адаптованою вручну для кожного завдання. Ефективність запропонованої структури була оцінена на основі робочого процесу управління архівами в Макао історичний архів і робочого процесу страхового відшкодування від австралійської страхової компанії. В обох тематичних дослідженнях система визначила значно поліпшену схему розподілу ресурсів в порівнянні з тією, яка існувала на момент збору даних для тематичних досліджень.

В роботі [16] запропоновано нове рішення, що дозволяє зменшити витрати на доставку замовлень у 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 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.

Використовуючи напрацювання вище наведених робіт необхідно створити систему моделювання транспортних перевезень матеріальних засобів у військових підрозділах, що використовує Петрі-об'єктні моделі для пошуку необхідної кількості транспортних засобів та їх маршрутів, які б зменшували загальний час затримки замовлень та економили використання пального на доставку.

Метою статті є створення системи моделювання транспортних перевезень матеріальних засобів у військових підрозділах, що використовує Петрі-об'єктні моделі для пошуку необхідної кількості транспортних засобів та їх маршрутів, які б зменшували загальний час затримки замовлень та економили використання пального на доставку.

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 геном 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. Для пошуку кращого рішення застосовується генетичний алгоритм, де в процесі моделювання отримуємо кращі рішення, які представляють собою необхідну кількість машин у кожному складі та маршрути розвезення військового устаткування для кожної машини [16]. Для схрещування обираємо половину популяції, які повернули кращі цільові функції. Краща половина популяції переходить у наступну ітерацію та дає потомство. Схрещування відбувається між i -тим та $(i+1)$ -тим, i -тим та $(i+2)$ -тим, $(i+1)$ -тим та $(i+2)$ -тим, $(i+2)$ -тим та $(i+3)$ -тим у рейтингу кращих рішень $i=(1,P/2)^{-} i+=2$, де P – розмір популяції. Між батьками випадковим чином обирається масив пріоритетів переходів та номер складу, до якого буде відряджено транспортний засіб. Кожна пара батьків генерує по одному нащадку.

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 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 $i = \overline{1, B1}$; $E2_i$ – 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, $i = \overline{1, N2}$ $j = \overline{1, B_t}$; $W3_{i,j}$ – загальна вага i -ого замовлення для j -ого стратегічного складу, $i = \overline{1, N3}$ $j = \overline{1, B3}$; $O1_{j,i}$ – кількість замовлень для i -ого маршруту, j -ого оперативного складу $j = \overline{1, B1}$; $i = \overline{1, M1}$ $j = \overline{1, B2}$; $O2_{j,i}$ – кількість замовлень для i -ого маршруту, j -ого тактичного складу $j = \overline{1, B2}$; $i = \overline{1, M2}$ $j = \overline{1, B3}$; $O3_{j,i}$ – кількість замовлень для i -ого маршруту, j -ого стратегічного складу $j = \overline{1, B3}$; $i = \overline{1, M3}$ $j = \overline{1, B4}$; $O4_{j,i}$ – кількість замовлень для i -ого маршруту, j -ого стратегічного складу $j = \overline{1, B4}$; $i = \overline{1, M4}$ $j = \overline{1, B4}$; 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, $i = \overline{1, (M1 + M2 + M3)}$; α – 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 матеріального забезпечення військових підрозділів 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:

$X = (T, W1, W2, W3, N1, N2, N3, M1, M2, M3, O1, O2, O3, O4, E1, E2, E3)$;

P – вхідні параметри:

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

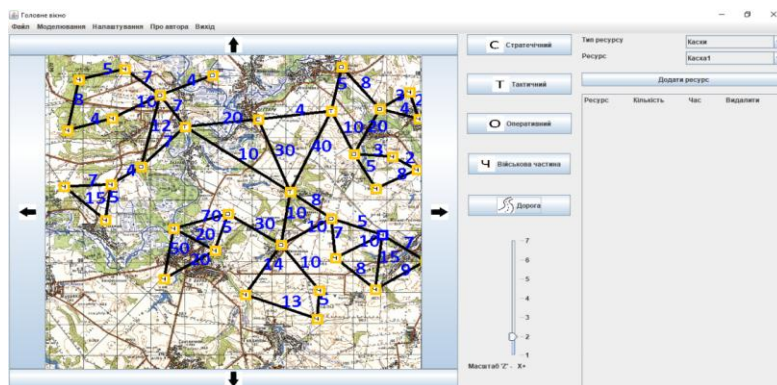


Рис. 1. Головне вікно системи моделювання транспортних перевезень матеріальних засобів у військових підрозділах

Дослідження. Моделювання транспортних перевезень матеріальних засобів було здійснено на мові програмування *Java* в інтегрованому середовищі розробки програмного забезпечення *IntelliJ IDEA*.

На рисунку 1 представлено головне вікно системи моделювання транспортних перевезень матеріальних засобів у військових підрозділах, де зображено основні військові об'єкти та шляхи перевезень.

Для проведення необхідних розрахунків пошуку маршрутів потрібно внести дані у відповідні форми та потім провести моделювання.

У таблиці 1 наведені результати експериментального дослідження моделювання транспортних перевезень матеріальних засобів у військових підрозділах для 16 оперативних складів, які використовують 32 машини.

Проаналізувавши дані таблиці можна дійти до висновку, що чим більша початкова популяція та більша кількість ітерацій генетичного алгоритму, тим краще значення цільової функції.

Можливо, якщо скористатися послугами дата-центру та збільшити початкову популяцію та кількість ітерацій генетичного алгоритму, то значення цільової функції ще більше покращиться, а час пошуку рішення суттєво зменшиться, що дозволить отримувати готові маршрути в реальному часі.

Таблиця 1

Результати експериментального дослідження моделювання транспортних перевезень матеріальних засобів

Коефіцієнти важливості економії палива та вчасної доставки замовлень 0,7; 0,3				Коефіцієнти важливості економії палива та вчасної доставки замовлень 0,3; 0,7			
Кількість початкової популяції	Кількість ітерацій генетичного алгоритму	Найкраще значення цільової функції	Модуль різниці між середнім значенням та поточним	Кількість початкової популяції	Кількість ітерацій генетичного алгоритму	Найкраще значення цільової функції	Модуль різниці між середнім значенням та поточним
8	6	30512	745,45455	8	6	13203	292,73
8	8	30279	512,45455	8	8	12982	71,73
8	10	29385	381,54545	8	10	12985	74,73
8	12	30296	529,45455	8	12	12994	83,73
16	6	30034	267,45455	16	6	12735	175,27
16	8	30030	263,45455	16	8	13094	183,73
16	10	29805	38,45455	16	10	12986	75,73
16	12	29804	37,45455	16	12	12874	36,27
32	6	29387	379,54545	32	6	12714	196,27
32	8	30029	262,45455	32	8	12710	200,27
32	10	27871	1895,54545	32	10	12736	174,27
Середнє значення:		27871		Середнє значення:		12910,2	7

Цікавим є той факт, що якщо цільові функції батьків майже однакові або дуже різні, то висока вірогідність того, що у всіх дітей цільова функція стає гірша за обох батьків.

Однак, якщо цільові функції батьків не дуже різні, то зазвичай один нащадок стає кращим за обох батьків, один нащадок стає гіршим за обох батьків, а два інших нащадки отримують значення цільової функції в діапазоні значень батьків.

Для першого експерименту при точності 529.45 достовірність 0.818.

Для другого експерименту при точності 200.27 достовірність 0.909.

Висновок.

Створено систему моделювання транспортних перевезень матеріальних засобів у військових підрозділах, що використовує Петрі-об'єктні моделі для пошуку необхідної кількості транспортних засобів та їх маршрутів, що дає змогу зменшувати загальний час затримки замовлень та економити використання пального на доставку.

Сформульована математична постановка транспортної задачі з обмеженим часом, в якій визначені обмеження моделі.

В якості цільової функції вибрано суму витрат пального та сумарну затримку доставок замовлень.

Описано алгоритм користування системою транспортних перевезень матеріальних засобів у військових підрозділах, яка дозволяє зменшити загальний час затримки доставки військового устаткування та зменшити витрати пального.

Отримано результати моделювання транспортних перевезень матеріальних засобів у військових підрозділах.

Дана модель дозволяє враховувати: 1) коефіцієнти важливості витрат палива та загальної затримки для всіх замовлень; 2) різні ресурси військового устаткування та додавання нових ресурсів за потреби; 3) налаштування вантажопідйомності для кожного транспортного засобу; 4) складність структури багаторівневих ієрархічних систем. 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.

Подальші дослідження будуть спрямовані на винайдення необхідної кількості транспортних засобів для виконання певних об'ємів замовлення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Цветков В.Я. Управление распределенными транспортными потоками / В.Я. Цветков, А.Н. Алпатов – Россия, Москва: Государственный Советник №3, 2014, С. 55-60.

2. Кажаров А.А. Разработка среды маршрутизации грузоперевозок / А.А. Кажаров, А.А. Рокотянский – Россия, Таганрог: Известия ЮФУ Технические науки №4(93), 2009, С. 174 – 181.

3. Гладков Л.А. Решение динамических транспортных задач на основе гибридных интеллектуальных методов и моделей / Л.А. Гладков, Н.В. Гладкова – Россия, Таганрог: Известия ЮФУ Технические науки №7(144), 2013, С. 102 – 107.

4. Сазонов В.В. Применение мультиагентных технологий в транспортной задаче с временными окнами и несколькими пунктами погрузки / В.В. Сазонов, П.О. Скобелев, А.Н. Лада, И.В. Майоров – Россия, Москва: Информационные технологии в управлении, 2016, С. 65 – 80.

5. Горбунов А.Р. Парадигмы имитационного моделирования: новое в решении задач стратегического управления / А.Р. Горбунов, Н.Н. Лычкина – Россия, Санкт-Петербург: ИММОД Бизнес-информатика №2, 2007, С. 60 – 66.

6. Корнев Д.А. Исследование алгоритмов работы информационной системы с использованием математического аппарата сетей Петри / Д.А. Корнев, Логинова Е.Ю. – Россия, Москва: Cloud of Science, 2014, С. 318 – 326.

7. Xinhua C. Computer Network Simulation Modeling Based / C. Xinhua, S. Ya-ni – Sichuan Information Technology College, China iJOE 2016, С. 25 – 28.
8. Стеценко І. В. Петрі-об'єктний підхід до побудови моделей динамічного розподілу ресурсів підприємства / І.В. Стеценко – Україна, Чернівці: Буковинський державний фінансово-економічний університет, 2014, С.132 – 134.
9. Стеценко І. В. Дослідження дискретно-подійних систем з використанням технології Петрі-об'єктного моделювання / І.В. Стеценко – Чернівці: УСиМ, 2014, № 5 С. 77 – 85.
10. 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.
11. Стеценко І. В. Інтелектуальний компонент візуального програмування стохастичних мереж Петрі / І.В. Стеценко, К.С. Лещенко – Чернігів: Технічні науки та технології №4(6) 2016 С. 139 – 147.
12. 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.
13. 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.
14. Gonzalo Mejia Petri nets and genetic algorithms for complex manufacturing systems scheduling / G. Mejia , С. Montoya , J.Cardona, A.L. Castro – United Kingdom: International Journal of Production Research №50(3), 2012. – С. 791 – 803.
15. Yain Whar Si A Petri Nets Based Generic Genetic Algorithm Framework for Resource Optimization in Business Processes / Y.W. Si, M. Dumas, V. Chan, D. Zhang – Netherlands: Simulation Modelling Practice and Theory Volume 86, 2018, – С. 72 – 101.
16. Бовда В.Е. Петрі-об'єктне моделювання транспортних перевезень матеріальних засобів у військових підрозділах / В.Е. Бовда, І.В. Стеценко, Е.М. Бовда – Україна, Київ: Збірник наукових праць ВІТІ № 3 2019 С. 6 – 15.