

DOI <https://doi.org/10.15407/usim.2019.02.016>
УДК 004.94

В.Ю. КОРОЛЬОВ, канд техн. наук, старший науковий співробітник,
Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України,
просп. Академіка Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна,
korolyov@i.ua

МАРШРУТИЗАЦІЯ ЛАНКИ КРИЛАТИХ РАКЕТ БАГАТОРАЗОВОГО ВИКОРИСТАННЯ

Запропоновано змістовну постановку задачі маршрутизації для ланки інтелектуальних крилатих ракет, застосовано модифіковану математичну модель транспортних засобів з декількома депо та подано загальну ієрархію моделей руху ланки.

Ключові слова: задача маршрутизації, комбінаторна оптимізація, модель транспортних засобів з декількома депо, крилата ракета.

Вступ

Розширення арсеналу українських ракет різного призначення ставлять питання про підвищення ефективності їх використання. Ракетне озброєння має складну логістику, є малосерійним виробом з високою собівартістю. Тому актуальним науковим завданням є виведення його на новий якісний рівень — підвищення результативності застосування та забезпечення можливого повторного використання.

Перспективні види ракет провідних армій світу використовують елементи штучного інтелекту, розподілення ролей під час руху і атаки, обмін даними у групі в оптичному або радіодіапазонах частот та багатократне повторне використання ракет у разі, якщо немає потреби знищення цілі всіма ракетами групи. Дослідження проблем ефективності використання зразків озброєнь і військової техніки виконуються в рамках теорії дослідження операцій для військових структур з кінця сорокових років двадцятого сторіччя. Нові технологічні можливості потребують оновлення і перео-

смилення розроблених моделей і постановок задач теорії дослідження операцій для сучасних видів озброєнь. Таким прикладом є моделі маршрутизації для низки транспортних засобів з декількома депо [1–7] та задача комбінаторної оптимізації для зграї безпілотних літальних апаратів (БПЛА) або групи безпілотних наземних роботів [3–7].

Постановка задачі

У роботах [1, 3–7] розглядалися задачі маршрутизації групи БПЛА, що піднімаються у повітря зі злітно-посадкової смуги або запускаються з катапульт. Перспективною є задача маршрутизації групи БПЛА або інтелектуальних крилатих ракет багаторазового використання [8], яку відправляють у політ з літака-носія, що знаходиться на безпечній відстані від засобів протиповітряної оборони та винищувачів супротивника. Розробник таких систем — фірма *Dynetics* називає їх гремлінгами [9–12] (рис. 1). На відміну від БПЛА, який може нести декілька ракет або бомб, крилата раке-

та багаторазового використання (гремлінг) є сама засобом ураження і знищення цілей. Розробка гремлінгів виконувалась в рамках дослідно-конструкторської роботи, яку курує *DARPA* (*The Defense Advanced Research Projects Agency*) — структура Міністерства оборони США, котра координує наукові дослідження і розробки військового призначення. Для опису поведінки ланки гремлінгів використовується термін рій/зграя (*Swarm*), що означає «множина безпілотних апаратів або роботів». Членів рою *DARPA* називає агентами. Для опису поведінки зграї та керування нею *DARPA* застосовує термінологію багатоагентних систем.

Аналіз характеристик об'єкта моделювання

Основним застосуванням гремлінгів є атака наземного об'єкта ланкою (групою, зграєю) з 4–20 гремлінгів, які виконують різні функції: ураження цілі, наведення, навігацію, ретрансляцію команд керування, взаємодію з БПЛА інших типів або військовим літаком, пілотованим людиною [9–12]. Тактика використання ланки гремлінгів подібна до тактики важко озброєної розвідки піхоти або вільного полювання літаків винищувачів — знайшов ціль — знищ її. За тактико-технічними характеристиками гремлінги більше подібні до крилатих ракет (безпілотних літаків–снарядів) типу «Томагавк» з дальністю польоту приблизно 1000 км і швидкістю, порівняною до звукової — 1150 км/г. Задача маршрутизації для ланки і окремого гремлінга може вирішуватися як на борту, так і на наземній або повітряній станції керування.

Гремлінги не мають коліс і не можуть здійснити посадку на злітно-посадкову смугу тимчасового аеродрому, хоча потенційно можуть спуститись на парашуті. Носій може приймати декілька гремлінгів ланки після виконання завдання на борт або на підвіски під крила за допомогою різних механізмів захоплення, якщо гремлінги не були використані для знищення цілі. Гремлінги, з точки зору аеродинаміки, мають вигляд ракети зі змінною геометрією крила

(рис. 1): крилата ракета або при повному згортанні крил — перетворюється на аеробалістичну ракету. Для задачі маршрутизації та керування польотом гремлінга це означає наступне: коли є крила зростає маневреність, але зменшується швидкість, коли немає крил — справедливе зворотне. Для виконання завдання залучатимуться декілька різнотипних літаків-носіїв для транспортування у місце запуску ланки гремлінгів та для підняття на борт після закінчення завдання різної кількості таких літальних апаратів. Гремлінги можуть також поповнювати запаси пального у спеціальних літаків-заправників під час польоту. Один гремлінг може застосовуватись 20 разів, дальність польоту складає приблизно 480 кілометрів.

Гремлінги можуть виконувати різні ролі, наприклад, у зонах де заглушені системи глобального позиціонування, частина ланки крилатих ракет перелаштовується на автономний аналіз місцевості, навігацію, повітряну розвідку, виконує імітацію радіолокаційних сигнатур різних літаків, здійснює радіоелектронну розвідку, радіоелектронну боротьбу (РЕБ) та наносить удари по об'єктам супротивника. Час підготовки гремлінга для наступного використання становить 24 години. Розробник описує лише варіант запуску гремлінгів з літака-носія [9–12], але крилаті ракети можуть запускатись з наземних ракетних пускових установок, кораблів та підводних човнів, тому логічно розширити способи запуску і на ці види військової техніки. Для задачі маршрутизації суттєво, що найбільша дальність польоту крилатої ракети буде для запуску з повітря, менша з корабля, з наземної пускової установки або шахти і найменша з підводного човна.

Для уникнення небезпечних зон, де розміщені засоби протиповітряної оборони (ППО), якщо вони не є ціллю групи, гремлінги можуть розділятися на пари, які обходитимуть небезпечну зону з різних сторін для зменшення ймовірності їх одночасного знищення. У зонах, де використовуються потужні засоби РЕБ для заглушення радіозв'язку, члени групи обмінюються даними за допомогою оптичних сигналів, які неможливо заглушити засобами РЕБ.

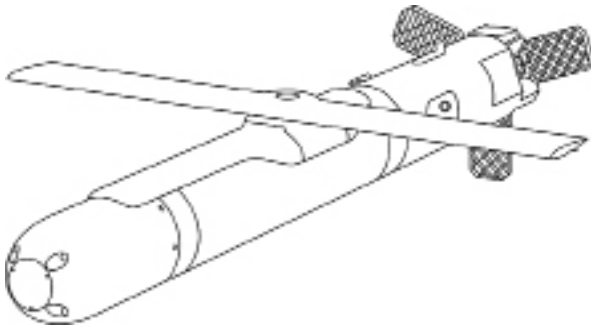


Рис. 1. Крилата ракета багаторазового використання «Гремлінг» фірми *Dynetics*, варіант з крилом, що може складатись за принципом ножиць

Побудова ієрархії моделей

Дослідження операцій для задачі атаки цілі дозволяє побудувати ієрархію моделей (рис. 2) «зверху—вниз» [13] для задачі керування ланкою крилатих ракет багаторазового використання (гремлінг). Для досліджень окремих процесів виконання завдання ланкою гремлінгів з ієрархії моделей будується ланцюг моделей:

- модель суперництва (конфліктної взаємодії) [13]. У вузькому сенсі — це модель нанесення вогневого удару по об’єкту за умови протидії супротивника [14, 15];
- модель розвідки [14, 15], яка включає підлеглі моделі повітряної, наземної та радіотехнічної розвідки;
- модель бойових дій, де використовується ланка гремлінгів;
- модель розподілу сил і засобів для виконання завдання;
- аеродинамічні моделі польоту ланки гремлінгів;
- модель маршрутизації групи транспортних засобів з декількома депо (етап до виконання завдання і після нього);
- модель пошуку цілі;
- модель наведення на ціль;
- модель нанесення удару, що описує способи знищення об’єкта в залежності від його типу.

Пари моделей: бойових дій і розвідки та маршрутизації і польоту ланки є сумісними [16], тобто на декількох етапах реалізації на комп’ютері одна модель з пари використовує

проміжні результати іншої як вхідні дані і навпаки, доки не буде закінчено моделювання.

В теорії дослідження операцій під ефективністю операції розуміють ступінь її пристосованості до виконання поставленої задачі. Оцінку ефективності системи протиповітряної оборони оцінюють на основі моделі протидії після пуску за допомогою ймовірності враження цілі, яку захищає супротивник. Для багатоступінчастої операції, якою є запуск ланки гремлінгів, ефективність операції є добутком ймовірностей успішності виконання кожного з N етапів [19]:

$$P_N = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_N. \quad (1)$$

Конкретизуємо цю формулу для випадку проходження зони протидії ракетою [14], тоді може виникнути одна з наступних подій:

- ракету знищено (ймовірність події p_3);
- ракету пошкоджено (ймовірність події p_n);
- ракету не знищено і не пошкоджено (ймовірність події $1 - p_3 - p_n$).

Тоді ймовірність враження цілі $P_{\text{вц}}$ дорівнює:

$$P_{\text{вц}} = p_n \cdot P_{\text{щ}} + (1 - p_n - p_3) \cdot P_{\text{ц}}, \quad (2)$$

де $P_{\text{вц}}$ і $P_{\text{ц}}$ — ймовірність враження цілі пошкодженою ракетою і непошкодженою ракетою відповідно. Ця формула доводить раціональність розробки інтелектуальної високотехнологічної зброї, оскільки зі зменшенням p_3 і p_n зростає ймовірність знищення об’єкта супротивника при протидії засобів ППО.

Ймовірність враження цілі за умови протидії супротивника. Розглянемо схему послідовних запусків ракет по об’єкту, який у відповідь на атаку запускає ракети ППО по атакуючим ракетам—гремлінгам. Нехай P_2 — ймовірність враження об’єкта гремлінгом, $P_{\text{вр2}}$ — ймовірність враження атакуючих ракет засобами ППО. Тоді ймовірність ураження об’єкта M гремлінгами дорівнює [14]:

$$P_N = P_2 \frac{1 - [(1 - P_2)(1 - P_{\text{вр2}})]}{1 - (1 - P_2)(1 - P_{\text{вр2}})}. \quad (3)$$

Ймовірність ураження L ракетами ППО одного гремлінга:

$$P_{\text{вр}N} = P_{\text{вр2}} (1 - P_2) \frac{1 - [(1 - P_2)(1 - P_{\text{вр2}})]}{1 - (1 - P_2)(1 - P_{\text{вр2}})}. \quad (4)$$

Ці формули показують, що зростання кількості ракет у ланці гремлінгів збільшує ймовірність враження цілі та дають оцінку кількості потрібних ракет для виконання задачі.

Декомпозиція на підзадачі

Для виконання завдання для ланки гремлінгів і сама ланка має виконувати декілька задач. Наведемо варіант його декомпозиції:

- задача розвідки;
- задача маршрутизації транспортних засобів (крилатих ракет);
- задача маршрутизації пакетів даних;
- задача дальнього наведення (навігація) ланки ракет;
- визначення позицій у просторі ракет з ланки (мультилатерація);
- задача ближнього наведення на ціль ланки ракет;
- оцінка нанесених втрат супротивнику (ступінь руйнування об'єкта або виведення військової техніки з ладу).

Постановка задачі комбінаторної оптимізації

Покажемо, що задача маршрутизації для гремлінгів зводиться до задачі маршрутизації транспортних засобів з декількома депо. Беручи до уваги міркування оцінки кількості гремлінгів — формули (1)–(4), зробимо змістовну постановку задачі маршрутизації для ланки інтелектуальних крилатих ракет багаторазового використання. Цю задачу можна було б розглядати як задачу маршрутизації транспорту з випадковими даними (*Stochastic Vehicle Routing Problem, SVRP*).

Задача маршрутизації для носія групи розбивається на три пов'язані задачі:

№ 1. Задача маршрутизації для групи літаків-носіїв ланки гремлінгів, що мають відправити і прийняти гремлінга на борт. Ця задача зводиться до задачі зустрічі сукупністю літаків-носіїв групи гремлінгів.

№ 2. Задача маршрутизації для групи різних типних БПЛА та гремлінгів [9–12], які ви-



Рис. 2. Ієрархія моделей виконання бойових завдань ланкою гремлінгів

конують обслуговування цілі, а саме: ударні операції, повітряну розвідку, заглушення засобів зв'язку і постановку завад засобами проти-повітряної оборони. Змістовну постановку такої задачі було розглянуто у публікаціях [4–7]. Нижче подано постановку задачі для ланки гремлінгів.

№ 3. Дозаправка БПЛА у повітрі є аналогічною за постановкою маршрутизації до задачі №1.

З цих трьох задач наведемо змістовну постановку задачі № 2. «Маршрутизація ланки гремлінгів».

Вхідні дані:

- кількість гремлінгів;
- кількість пального у кожного з гремлінгів;
- кількість літаків-носіїв або інших засобів запуску крилатої ракети багаторазового використання;
- кількість пального у кожного літака-носія;
- координати зон, безпечних для прийняття гремлінгів на борт носіїв.

Параметри:

- максимальна дальність передачі сигналу зв'язку між групою гремлінгів і носіями;
- дальність польоту при заданій кількості пального і корисному навантаженні.

Вихідні дані:

- таблиця маршрутів гремлінгів.

Критерії:

- мінімум часу виконання завдання;
- мінімум літальних апаратів, пілотованих людиною, та гремлінгів.

Математична модель. Ця проблема маршрутизації відноситься до задач оптимізації комбінаторного типу [1–7], які можна подати за допомогою спеціального графа $G(V, E)$. Заданий ряд точок V_e , які треба відвідати, щоб уникнути протидії засобів ППО і РЕБ та дістатись зони наведення на ціль. Є множина V_a (депо) точок, з яких можуть стартувати гремлінги, а також V_b – множина точок, куди вони можуть повертатися. Таким чином, на основі цих множин будується граф з точок накладених на карту.

Введемо такі позначення.

$G(V, E)$ – граф, де $V = V_a \cup V_b \cup V_e$, а E – множина ребер;

C – матриця невід’ємних відстаней (вартості шляху) c_{ij} між точками $v_i, v_j \in V$;

m – кількість гремлінгів;

R_i – маршрут i -го гремлінга ($i = 1, \dots, m$);

R – сукупність маршрутів R_i ($i = 1, \dots, m$);

$C(R_i)$ – вартість маршруту R_i ($i = 1, \dots, m$);

$K(v)$ – вага кожної вершини $v \in V_e$, що означає важливість її відвідування;

q_i – ресурс руху i -го гремлінга ($i = 1, \dots, m$).

Кожна точка (вершина графа задачі) v_i задається координатами (x_i, y_i) . Задача маршрутизації полягає у визначенні такої множини маршрутів m з мінімальною загальною вартістю, щоб кожна вершина підмножини V_e була відвідана тільки одним гремлінгом мінімум разів. Крім того, маршрути повинні починатися у вершинах підмножини V_a і закінчуватися в будь-якій точці з підмножини V_b .

Визначення відстані між точками для доставки відбувається за стандартною формулою для прямокутної системи координат:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (5)$$

Розв’язком задачі є розбиття множини V_e на підмножини з приписуванням їм конкретного наявного гремлінга та визначення порядку обходу вершин у кожній такій підмножині (перестановка вершин маршруту). Розв’язки задачі,

при яких не всі точки з множини V_e відвідуються, є недопустимими.

Цільовою функцією в загальному випадку є вартість розв’язку задачі:

$$F_{VRRP} = \frac{\sum_{i=1}^m K(V_i)}{\sum_{i=1}^m C(R_i)} \quad (6)$$

де $K(v_i)$ – вага вершин v_i , що входять до маршруту R_i , ($i = 1, \dots, m$), $C(R_i)$ – сума довжин ребер маршруту R_i , ($i = 1, \dots, m$). Іншими словами, потрібно знайти допустимий розв’язок з максимальним значенням цільової функції (6). Також введено такі обмеження для умов задачі:

- кожна вершина множини V_e обов’язково має бути відвідана;

- довжина кожного маршруту R_i не повинна перевищувати заданої максимальної дальності польоту гремлінга q_i ;

- вартості ребер графа, тобто шляхів між точками відповідно до формули (5) можуть модифікуватись додатковими обмеженнями – погодними умовами, загрозами, тощо.

Таким чином, ця задача подібна до задачі **Multiple Depot VRP, MDVRP** (або задачі маршрутизації транспортних засобів з декількома депо) [1, 3] за наявності додаткових обмежень.

Розглянемо алгоритм швидкої побудови наближеного розв’язку поставленої задачі. Траекторія, для якої розробляється польотний план, проходить через множину просторових повітряних коридорів, що розбиваються на куби; розмір кубу дорівнює частині об’єму (мульти)конічної зони обстеження сенсорами гремлінга ланки з певної точки та визначається аеродинамічними характеристиками ракети. В якості точок, які слід включати у маршрути, вибираються геометричні центри таких кубів. У центрі кожного з цих кубів ставиться точка, з якої формується множина точок для відвідування.

Таким чином, у випадку, якщо гремлінги відвідують кожну з цих точок, то вони успішно пройдуть шлях до цілі. Разом з координатами депо (рухомі захоплювачі гремлінгів на літаках) ці точки формують множину V .

На другому етапі оператор системи обирає критично важливі точки з множини V . Це місця підвищеної уваги — міста та селища, дороги, місця потенційних позицій ППО і РЕБ супротивника тощо. Ці точки матимуть значно вищу вагу K_i у розв'язку, ніж решта точок, і вони формують підмножину V_c .

На третьому етапі виконується побудова маршрутів. При цьому в першу чергу відвідуються усі критично важливі точки з підмножини V_c . Далі (після того, як усі критично важливі точки відвідані) гремлінги мають відвідати якомога більше некритичних точок з множини V . Для побудови оптимального маршруту слід оцінити вагу ребер. Також для цієї мети може застосовуватись детермінований локальний пошук. При цій побудові маршруту враховуються такі обмеження як погодні умови (в першу чергу несприятливий зустрічний вітер), обсяг пального гремлінга (з урахуванням необхідності повернення до депо для дозаправки), кількість попередніх запусків ракети (до 20 польотів) та ін. Обмеження враховуються збільшенням ваги ребер.

В подальшому планується враховувати як додаткові обмеження небезпечні зони, де можлива присутність ворожих засобів протиповітряної оборони. Дані по небезпеці планується враховувати окремо. Наразі оператор може обирати певні райони карти як небезпечні, і маршрути за можливості будуватимуться в об-

хід цих районів. Врахування ризиків виконується оператором, який володіє додатковою інформацією з цього приводу.

Задача є динамічною — в будь-який момент часу умови можуть змінитись. В цьому випадку слід виконати перебудову маршрутів на основі змінених умов та з урахуванням вже подоланої частини маршруту.

Висновки

Запропоновано нову змістовну постановку задачі маршрутизації для групи крилатих ракет багаторазового використання, що є перспективним видом озброєння.

Вперше показано, що математична модель руху крилатих ракет багаторазового використання може бути зведена до моделі маршрутизації транспортних засобів з декількома депо.

Вперше побудована ієрархія моделей для дослідження операцій атаки на об'єкт ланкою крилатих ракет та виконана декомпозиція задачі дозволяє продовжити дослідження в даному напрямку з метою вдосконалення вирішення проблем підвищення ефективності застосування ракет.

Можливим впровадженням дослідження є вдосконалення алгоритмів маршрутизації крилатих ракет з метою збільшення ймовірності знищення цілей захищених системами ППО і засобами РЕБ та зниження вартості атаки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Горбулін В.П., Гуляницький Л.Ф., Сергієнко І.В. Постановки та математичні моделі проблем оптимізації маршрутів літальних апаратів із динамічними депо. УСиМ, 2019, №1. С. 3–10.
2. Golden B., Raghavan S., Wasil E. The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges, New York: Springer, 2008.
3. Гуляницький Л.Ф. Проблема оптимізації маршрутов транспортних средств с временными окнами. Компьютерная математика, 2007, № 1. С. 122–132.
4. Корольов В.Ю., Огурцов М.І. Транспортно-комунікаційна задача для груп безпілотних апаратів. Математичні машини і системи. 2017. № 1. С. 82–89.
5. Огурцов М.І., Ходзінський О.М. Розробка алгоритмів розв'язання задачі маршрутизації транспортних засобів з часовими вікнами. Комп'ютерна математика. 2016. №1. С. 134–142.
6. Корольов В.Ю., Ходзінський О.М. Тополого-комбінаторна модель побудови мереж для транспортних засобів. Комп'ютерна математика. 2018. №1. С. 61–67.
7. Корольов В.Ю., Поліновський В.В., Огурцов М.І. Моделювання мереж зв'язку рухомих дистанційно керованих систем на базі HLA. Вісн. Хмельницьк. нац. ун-ту. 2017. №1(245). С. 160–165.

8. *Ануреев И.И.* Ракеты многократного использования. М.: Воениздат. 1975, 214 с.
9. Dynetics selected for demonstration phase of DARPA's Gremlins program. <https://www.dynetics.com/newsroom/news/2018/dynetics-selected-for-demonstration-phase-of-darpas-gremlins-program>
10. *Mr. Scott Wierzbanski.* Gremlins. <https://www.darpa.mil/program/gremlins>
11. The Gremlins Program Fact Sheet. https://www.dynetics.com/_files/strike-systems/Dynetics%20Gremlins.v2.pdf.
12. Collaborative Operations in Denied Environment (CODE) Phase 2 Flight Tests. <https://www.youtube.com/watch?v=FckLyWn1hfk>
13. *Самарский А.А., Михайлов А.П.* Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. М.: Физматлит, 2002, 320 с.
14. *Чуев Ю.В.* Исследование операций в военном деле. М.: Воениздат, 1970. 256 с.
15. *Вентцель Е.С.* Введение в исследование операций. М.: Сов. радио, 1964. 388 с.
16. Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования: в 2 т. Ин-т вычисл. математики. М.: Наука, 2005. Т.2. Математическое моделирование. 405 с.

Надійшла 14.12.2018

REFERENCES

1. *Gorbulin, V.P., Gulianitsky, L.F., Sergienko, I.V.*, 2019. "Statements and mathematical models of problems of optimization of routes of aircraft with dynamic depots". *Upravl iye sistemy i ma iny*, 1, pp. 3–10. (In Ukrainian).
2. *Golden, B., Raghavan, S., Wasil, E.*, 2008. *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*, New York: Springer-Verlag US, 591 p, DOI 10.1007/978-0-387-77778-8.
3. *Gulianitsky, L.F.*, 2007. "Problem of optimization of routes of vehicles with time windows". *Computer mathematics*, 1, pp. 122–132. (In Ukrainian).
4. *Korolyov, V.Yu., Ogurtsov, M.I.*, 2017. "Transport and communication problem for groups of unmanned vehicles". *Mathematical Machines and Systems*, 1, pp. 82–89. (In Ukrainian).
5. *Ogurtsov, M.I., Hodzinsky, O.M.*. 2016. "Development of algorithms for solving the problem of routing vehicles with time windows". *Computer mathematics*, 1, pp. 134–142. (In Ukrainian).
6. *Korolyov, V.Yu., Hodzinsky, O.M.*, 2018. "Topology-Combinatoric Model for Building Networks of Vehicles". *Computer Mathematics*, 1, pp. 61–67. (In Ukrainian).
7. *Korolyov, V.Yu., Polinovskiy, V.V., Ogurtsov, M.I.*, 2017. "Modeling of communication networks of mobile HLA distance-controlled systems". *Bulletin of the Khmelnytsky National University*, 1(245), pp. 160–165. (In Ukrainian).
8. *Anureev, I.I.*, 1975. Reusable rockets. Moscow, Voensizdat, 214 p. (In Russian).
9. Dynetics selected for demonstration phase of DARPA's Gremlins program. [online] Available at: <<https://www.dynetics.com/newsroom/news/2018/dynetics-selected-for-demonstration-phase-of-darpas-gremlins-program>> [Accessed 18 May, 2018].
10. *Mr. Scott Wierzbanski.* Gremlins. [online] Available at: <<https://www.darpa.mil/program/gremlins>> [Accessed 30 May, 2018].
11. The Gremlins Program Fact Sheet. [online] Available at: <https://www.dynetics.com/_files/strike-systems/Dynetics%20Gremlins.v2.pdf> [Accessed 21 May, 2018].
12. Collaborative Operations in Denied Environment (CODE) Phase 2 Flight Tests. [online] Available at: <<https://www.youtube.com/watch?v=FckLyWn1hfk>> [Accessed 21 May, 2018].
13. *Samarskiy, A.A., Mikhailov, A.P.*, 2002. *Mathematical Modeling: Ideas. Methods. Examples*. Moscow, Fizmatlit, 320 p. (In Russian).
14. *Chuyev, Yu.V.*, 1970. *Operations Research in Military Affairs*. Moscow, Voensizdat, 256 p. (In Russian).
15. *Ventzel, E.S.*, 1964. *Introduction to the study of operations*. Moscow, Soviet Radio, 1964, 388 p. (In Russian).
16. Modern problems of computational mathematics and mathematical modeling, 2005. In-t of Computation Mathematics. Moscow, Science, T.2. Mathematical modeling. 405 p. (In Russian).

Received 14.12.2018

V.YU. Korolyov, PhD (Eng.), Senior Research Associate,
V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of National Academy of Sciences of Ukraine,
40, Acad. Glushkova Ave., 03187, Kyiv, Ukraine,
korolyov@i.ua

ROUTING FOR A SWAM CRUISE ROCKETS OF MULTIPLE USE

Introduction. Missile weapons have complex logistics, there is low-volume product with high cost. The testing of a number of Ukrainian missiles of various uses raises the question of improving the efficiency of their use. Therefore, the actual scientific task is to increase the effectiveness of its application and to ensure reuse whenever possible.

Purpose. The purpose of the article is to optimize the routing of multiple-use cruise missiles (MUCMs) provided that the enemy is countered.

Methods. For a meaningful statement of the optimization problem, a probabilistic model of rocket firing was considered, taking into account counteraction of the enemy, decomposition of tasks, hierarchical construction of the models of combat actions for MUCMs, probability theory, combinatorial optimization.

Result. A meaningful statement of the problem of combinatorial optimization for the swarm of MUCMs is executed. It is shown that this problem can be considered as a routing task for vehicle with random data (Stochastic VRP, SVRP). The consideration is given to the estimation of the required amount of MUCMs and the methods of solving the problem are proposed.

Conclusion. For the first time, a meaningful statement of the routing problem for a swarm of MUCMs, which is an upcoming weapon, is proposed. It is shown that the mathematical model of the motion of MUCMs can be reduced to the model of routing of vehicles with several depots. The hierarchy of models for research operations of attack on the object by a swarm of cruise missiles and constructed decomposition of tasks has been given, which allows us to continue research in this direction in order to maximize economic efficiency use of missiles.

Keywords: *routing problem, combinatorial optimization, model of vehicles with multiple depots, cruise missile.*

В.Ю. Корольов, канд. техн. наук, старший научный сотрудник,
Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины,
просп. Академика Глушкова, 40, Киев, 03187, Украина,
korolyov@i.ua om

МАРШРУТИЗАЦИЯ ЗВЕНА КРЫЛАТЫХ РАКЕТ МНОГОРАЗОВОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Введение. Ракетное вооружение имеет сложную логистику, является малосерийным изделием с высокой себестоимостью. Испытания ряда украинских ракет различного назначения ставят вопрос о повышении эффективности их использования. Поэтому актуальным научным направлением является повышение результативности его применения и обеспечения повторного использования по возможности.

Цель статьи. Целью статьи является оптимизация маршрутизации крылатых ракет многоразового использования (КРМИ) при условии противодействия противника.

Методы. Для содержательной постановки задачи оптимизации использовались: вероятностная модель стрельбы ракетами с учетом противодействия противника, декомпозиция задач, иерархическое построение моделей боевых действий для КРМИ, теория вероятностей, комбинаторная оптимизация.

Результат. Выполнена содержательная постановка задачи комбинаторной оптимизации для звена КРМИ. Показано, что эту задачу можно рассматривать как задачу маршрутизации транспорта со случайными данными (*Stochastic VRP, SVRP*). Даны рекомендации по оценке необходимого количества КРМИ и предложены методы решения задачи.

Выводы. Впервые предложено содержательную постановку задачи маршрутизации для звена КРМИ, являющегося перспективным видом вооружения. Показано, что математическая модель движения КРМИ может быть сведена к модели маршрутизации транспортных средств с несколькими депо. Построена иерархия моделей для исследования операций атаки на объект звеном крылатых ракет и выполнена декомпозиция задач, что позволяет продолжить исследования в данном направлении с целью совершенствования решения проблем повышения эффективности применения ракет.

Ключевые слова: задача маршрутизации, комбинаторная оптимизация, модель транспортных средств с несколькими депо, крылатая ракета.