

МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ РУХОМИХ ДИСТАНЦІЙНО КЕРОВАНИХ СИСТЕМ НА БАЗІ HLA

Предметом розгляду стала побудова архітектур обчислювальних систем для моделювання спеціальних мереж та формалізація задачі маршрутизації рухомих керованих систем, що обстежують певну територію. Проблему зведено до задачі маршрутизації з декількома депо за наявності додаткових обмежень. Побудовану модель застосовано в ході розробки алгоритмів розв'язування практичних задач децентралізованого керування рухом груп безпілотних літальних апаратів.

Ключові слова: моделювання, мережа, робот, архітектура, транспортна задача, безпілотні апарати, БПЛА, HLA.

V.YU. KOROLYOV, V.V. POLINOVSKIY, M.I. OGURCZOV

Institute of Cybernetics of National Academy of Sciences of Ukraine

HLA BASED MODELLING OF COMMUNICATIONS NETWORKS OF REMOTELY CONTROLLED MOVING SYSTEMS

The article was a summary of development a simulation model of a special network for further study it interaction with other virtual objects based on computing platform-independent high-level architecture (HLA) IEEE 1516. The requirements for queries and description set of the object model for HLA network architecture became the basis for setting content optimization problem for the team of mobile robotic systems whose members can go on autopilot. An illustrative example was given for a group of UAVs. Feature problem in this formulation is that the traffic problem for vehicles and communication tasks of routing data packets must be solved simultaneously. Formalization and decomposition of the problem was made and shown that the mathematical model for the task is the task of constructing routes for vehicles. The problem was reduced to a routing problem with multiple depots with additional restrictions. That optimization problem belongs to the class NP-hard problems and computational complexity of it depends on the size of the input data exponentially. At issue was the construction of architectures of computer systems for modelling and formalization of ad hoc networks routing problems of mobile control systems, which examine specific territory. The developed model was used to develop algorithms for practical problems of decentralized motion control groups of unmanned aerial vehicles and unmanned ground vehicles.

Keywords: modelling, network, robot, architecture, transport problem, drones, UAV, HLA.

HLA (High Level Architecture – архітектура високого рівня) [1–5] слугує основою для створення систем розподіленого моделювання та візуалізації. HLA було стандартизовано у 2010 році міжнародним інститутом стандартів і подано у виді серії керівництв IEEE 1516 по розробці систем розподіленого моделювання. Стандартизація дозволила організувати складні віртуальні навчання, в яких беруть участь модельні засоби різних розробників та повторно використовувати створені віртуальні об'єкти.

Варто зазначити, що хоча розробка HLA ініційована Міністерством оборони США, архітектура є відкритим стандартом. У 2000 році HLA був оформлений та прийнятий, як IEEE 1516 [1]. Він розвивається і підтримується підрозділом DMSO (Defense Modeling & Simulation Office) Міністерства Оборони США [2] та прийнятий як стандарт НАТО - STANAG 4603 [3].

В даний час HLA знаходить все більше застосування і в цивільній сфері при розробці симуляторів і тренажерів для тренування персоналу складних технічних систем в авіації, космонавтиці, транспорті тощо, стаючи промисловим стандартом і в цій області. В даній роботі пропонується дослідити можливість використання HLA як основи для моделювання чарункових [4] і Ad hoc мереж децентралізованого керування рухом груп безпілотних літальних апаратів (БПЛА), та безпілотних наземних роботів (БНР).

Моделювання передачі даних для рухомих об'єктів (БПЛА, БНР) та протоколів взаємодії транспортних засобів (ТЗ) у чарункових і Ad hoc мережах на базі HLA, базується на таких основних засадах:

- відмова від простих імітаційних моделей, орієнтованих тільки на конкретного користувача, створення моделей, орієнтованих на користувачів високого рівня;
- складність, в окремих випадках неможливість врахування всіх сфер застосування імітаційного моделювання;
- гнучкість комбінування окремих симуляторів в складні імітаційні моделі;
- відкритість розподіленої архітектури моделювання для майбутніх технологій моделювання та імітації.

Основою HLA [5, 6] є об'єднання множини об'єктів, що беруть участь у процесі розподіленого моделювання у динамічні сутності – федерації. Об'єкти у складі федерації називають федератами. Федерати і утворена з них федерація є формою абстрагування. Федератами можуть бути як комп'ютерні імітаційні моделі, так і реальні технічні зразки, працівники, автоматизовані системи керування, комунікаційні системи підтримки операцій та інші об'єкти, для яких представлено опис і правила функціонування відповідно до стандарту.

Атомарними структурами віртуального простору є федерати, що створюють для учасників федерації єдину віртуальну територію для взаємодії в рамках імітаційної моделі, що дозволяє симулювати пори року, час доби і погодні умови. Середовищем взаємодії федератів для моделі побудованої на базі

архітектури HLA є RTI (Real Time Infrastructure – інфраструктура реального часу). Сучасні RTI є хмарним віртуальним сервісом [7] для взаємодії федератів у єдиному модельному часі та обміні даними між ними.

Так, наприклад, якщо федерат – це імітаційна модель групи БПЛА, RTI забезпечує передачу значень, що характеризують висоту, швидкість і траєкторію польоту іншим учасникам федерації. У випадку необхідності передається також ще і аудіовізуальний образ і технічні характеристики. В результаті керівник тренувань спостерігає віртуальні переміщення цієї групи БПЛА на карті.

Архітектура HLA використовує протоколи високого рівня, тобто не накладає обмеження на комп'ютерну реалізацію федератів і RTI. Стандарт IEEE 1516 на якому ґрунтується HLA є набором рекомендацій по створенню протоколів для пакетів даних, якими обмінюються федерати, та правилами їх взаємодії. Дотримуючись рекомендацій стандарту, розробник може створювати імітаційні моделі сумісні з різними комп'ютерними комплексами та власні варіанти RTI.

В даний час HLA надає розробникам сучасні засоби створення складних імітаційних моделей на модульних принципах, з окремих компонентів з добре визначеною функціональністю та інтерфейсами.

Архітектура і стандарти HLA орієнтовані на створення розподілених динамічних моделей, для яких характерна взаємодія груп однотипних об'єктів, що обмінюються інформацією про свій поточний стан. Велика увага при цьому приділяється фактору часу.

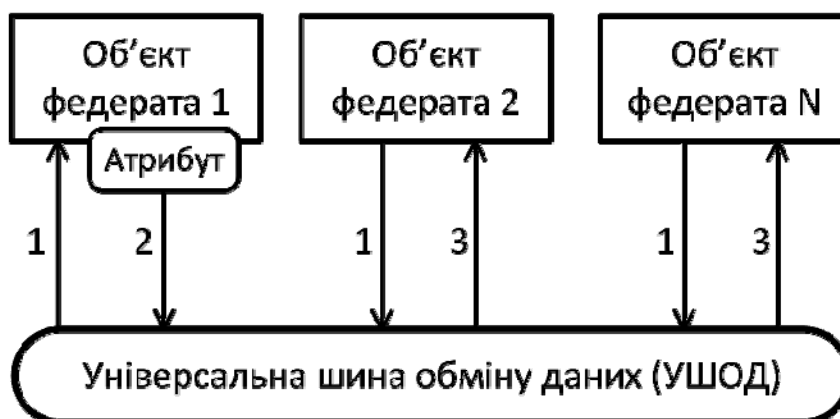
Основна ідея HLA полягає в тому, щоб відокремити специфічні функціональні можливості моделювання від загальних. Для підтримки останніх розроблена універсальна шина обміну даними (УШОД) аналог, RTI (Run-Time Infrastructure) в HLA. RTI, подібно розподіленій операційній системі, забезпечує функціональність, необхідну для взаємодії об'єктів всередині розподіленої моделі.

Модель в HLA розглядається як набір моделей різного рівня агрегування. На нижньому рівні розташовані моделі компонентів системи – об'єктів. Об'єкти в HLA – сукупності, що моделюють конкретні елементи обстановки. Їх взаємодії відображають взаємодії між реальними об'єктами.

В окремі моделі виділено управління об'єктами або групами об'єктів. Це можуть бути математичні чи інші описи, імітовані програмними засобами. Як було сказано у вступі, в HLA ці імітаційні моделі (симулятори) мають спеціальну назву – федерати. Крім симуляторів до федератів відносяться також деякі службові програмні компоненти, наприклад, зайняті збором інформації від засобів виявлення, спостереження. Сукупність усіх федератів, які беруть участь у моделюванні, працюють в інтересах вирішення певної конкретної задачі, називається федерацією. Тобто основна мета HLA – підтримка інформаційних обмінів в рамках федерації між федератами, що співпрацюють.

У HLA інформація, якою обмінюються федерати, буває двох видів: стан об'єкта та інтеракція. Всі обміни даними між федератами відбуваються через RTI. Механізм обміну реалізований у вигляді підписки. Федерат, зацікавлений в отриманні певних атрибутів і взаємодій, повинен підписатися на них через RTI. При цьому, для зниження завантаження каналів зв'язку RTI відстежує тільки зміни даних (рис. 1). Завдяки цьому в ЄАСУ(єдина автоматизована система управління) суттєво може знизитися навантаження на канал обміну службовою інформацією (RTI ЄАСУ), крім цього, підвищиться прозорість протоколів обміну інформацією та безпека інформації, що передається в каналі RTI (рис. 1).

Кожен з цих сервісів має чітко прописаний інтерфейс, в результаті чого мовні й платформні особливості реалізації федератів стають несуттєвими, тобто в рамках HLA забезпечується повна інтероперабельність федератів і RTI.



1 – попередня підписка на атрибут; 2 – інформація про зміну атрибута; 3 – подія «зміна атрибута»
Рис. 1. Схема обміну значеннями атрибутів через УШОД (RTI)

Архітектура HLA повністю визначається наступними трьома компонентами:

- еталонною об'єктною моделлю;
- правилами федерації;
- специфікацією інтерфейсів.

Еталонна об'єктна модель – істотний компонент HLA, оскільки вона:

- надає механізм для визначення обміну даними та загальної координації серед членів федерації;

- забезпечує загальний, стандартизований механізм для опису можливостей потенційних учасників федерації;
- полегшує розробку і застосування загальних інструментальних засобів для HLA моделей об'єктів.

Правила HLA задають поділ прав і обов'язків федератів у федерації, і лежать в основі стандарту взаємодії моделей в HLA.

Специфікації інтерфейсів визначають стандартні інтерфейси для робочої інфраструктури RTI (Run-Time Infrastructure), а також визначають функції зворотного виклику, що надаються усіма федератами, через які RTI може звертатися до його функціональності. Таким чином, специфікації інтерфейсів визначають, як федерати взаємодіють з федерацією, або, зрештою, між собою (рис. 2).

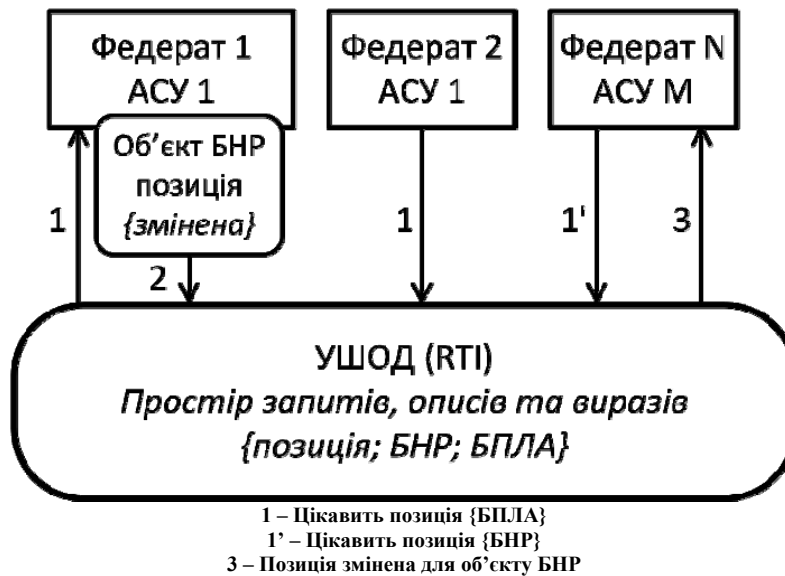


Рис. 2. Приклад взаємодії федератів за допомогою описів та інтерфейсів RTI ЄАСУ

RTI створює окремий прошарок в операційній системі, який забезпечує специфічну функціональність HLA.

Програмні реалізації RTI

Існують системи, що реалізують ідеї HLA на різних мовах програмування: C, C ++, ADA, MODSIM, Smalltalk і ФОРТРАН [8]. Деякі конкретні реалізації HLA побудовані на базі CORBA. Зокрема HLA RTII.3NG-v2 (v3.2) базується на ORB TAO та відповідних CORBA службах розсилки повідомлень [2].

Інструментальні засоби

В даний час в рамках розробки та впровадження програмного забезпечення за програмою HLA розроблені прикладні програмні інтерфейси для CORBA IDL, C ++, Ada, Java. Вони є частиною специфікації HLA [1]. Що стосується імітаційних моделей, які використовуються для створення федерацій, єдина вимога при розробці відповідного програмного забезпечення – ця реалізація повинна бути виконана в рамках об'єктно-орієнтованого підходу і відповідати специфікації інтерфейсів HLA. Для розробки HLA-сумісних програм існує широкий набір інструментальних засобів, як безкоштовних, так і комерційних [9]. До таких засобів належать, наприклад:

- DCT (Data Collection Tool) – засіб для збору та аналізу переданих між симуляторами даних;
- OMDT (Object Model Development Tool) – засіб для розробки моделей класів модельованих сутностей;
- FEPW (Federation Execution Planner's Workbook) – редактор для розробки та верифікації процесу виконання моделі.

Ці та інші інструменти розвиваються як засоби автоматизації підтримки окремих завдань, що виникають на різних етапах життєвого циклу федерації.

Наповнення простору запитів імітаційної моделі покажемо на прикладі змістовної постановки задачі оптимізації системи зв'язку (маршрутизація пакетів даних у мережі) і побудові польотного завдання (маршрутів руху) для групи БПЛА (рис. 3).

Умови транспортно-комунікаційної задачі для групи РРС з автономним рухом

Задача. Побудувати маршрути до об'єктів з мінімальним часом руху до місць призначення і мінімальною кількістю РРС та визначити час автономного руху.

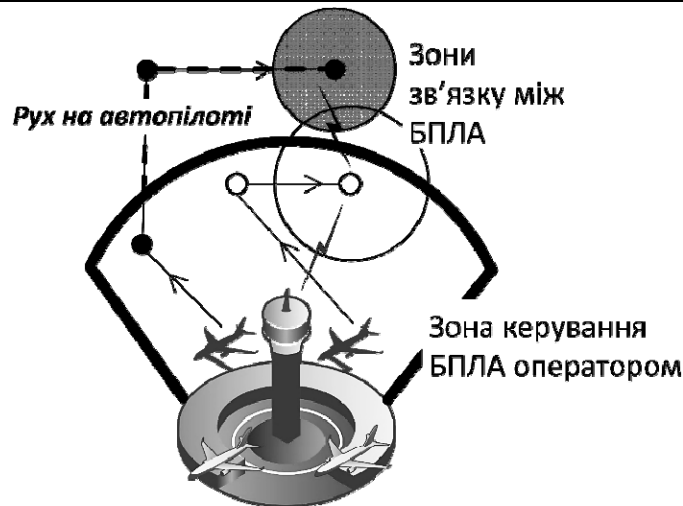


Рис. 3. Ілюстрація побудови маршрутів для двох РРС, один з яких проходить частину шляху на автопілоті

Вхідні дані:

- місця призначення (об'єкти, які слід відвідати), місця посадок РРС (депо);
- кількість РРС;
- ресурс ходу/руху (кількість пального, заряд акумулятора);
- інтервали запуску і посадки РРС, кількість одночасно запущених РРС (підтримує станція керування), час підготовки до польоту (зарядка акумуляторів);
- маршрут руху, місця зупинок і їх тривалість для пункту керування РРС.

Параметри:

- максимальна дальність передачі сигналу;
- максимальна кількість ретрансляцій польотних завдань;
- пропускна здатність ретранслятора;
- обсяг інформації, що передається в різних режимах;
- максимально допустима затримка сигналу;
- частота опитування РРС.

Критерії:

- мінімізація сумарного шляху руху РРС та їх кількості;
- мінімізація кількості ретрансляцій;
- мінімізація суми радіусів випромінювання за лінією розмежування;
- максимізація інформації, що передається.

Особливістю постановки транспортно-комунікаційної задачі є те, що формування польотних завдань до точок призначення і побудова маршрутів пакетів даних у спеціальній мережі мають виконуватись сумісно.

Математична модель. Ця задача маршрутизації відноситься до комбінаторних задач, які можна представити у вигляді графа $G(V, E)$ [10,11]. Є заданий ряд точок V , які треба відвідати. Вони представляють собою множину точок $v_s... v_n$. Є множина депо v_0, \dots, v_p , або точок, з яких можуть стартувати БПЛА. На основі цих двох множин будується плоский планарний граф, накладений на карту.

Введемо такі позначення.

$G(V, E)$ – граф;

$V = \{v_0, \dots, v_p, v_s, \dots, v_n\}$ – множина вершин (v_0, \dots, v_p – депо, v_s, \dots, v_n – точки, що слід відвідати);

E – множина ребер $\{(v_i, v_j) \mid i \neq j\}$;

C – матриця невід'ємних відстаней (вартості шляху) c_{ij} між точками, що слід відвідати;

m – кількість транспортних засобів (ТЗ) – РРС;

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

R – сукупність маршрутів R_i ($i=1..m$);

$C(R_i)$ – вартість маршруту R_i ;

q_i – ресурс руху i -го ТЗ.

Кожна вершина V_i має набір координат X_i, Y_i – це координати клієнта. Завдання маршрутизації полягає у визначенні такої множини маршрутів m з мінімальною загальною вартістю, щоб кожна вершина підмножини $V_e = \{v_s, \dots, v_n\}$ була відвідана тільки одним ТЗ і тільки один раз. Крім того, всі маршрути повинні починатися і закінчуватися в будь-якій точці з множини депо (v_0, \dots, v_p).

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

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (1)$$

Розв'язком задачі є розбиття множини V на підмножини (маршрути) та виконання порядку обходу

на кожній 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:

$$F_{VRP} = \sum C(R_i), \quad (2)$$

де $C(R_i)$ – сума довжин ребер маршруту R_i , $i = 1, \dots, m$.

У класичному варіанті потрібно знайти допустимий розв'язок з мінімальною вартістю. Також в даній роботі вводяться такі обмеження для умов задачі:

- довжина кожного маршруту R_i не повинна перевищувати максимальної дальності польоту РРС q_i ;
- у випадку, якщо частина точок з множини V_e знаходиться поза зоною зв'язку станції керування, мають використовуватись ретранслятори для підсилення сигналу;
- вартості шляхів між точками можуть модифікуватись додатковими обмеженнями – погодними умовами, загрозами, тощо.

Таким чином, ця задача зводиться до задачі **Multiple Depot VRP, MDVRP** (або транспортна задача з декількома депо) з додатковими обмеженнями. Задачі маршрутизації транспорту (Vehicle Routing Problems, VRP), включаючи MDVRP – це оптимізаційні задачі, що відносяться до класу NP-важких задач [12]; це означає, що обчислювальна складність задачі залежить від розміру вхідних даних експоненційно.

Розглянемо тепер шлях розв'язання поставленої задачі. Для побудови оптимального маршруту слід оцінити вагу ребер. При цій побудові маршруту враховуються такі обмеження як погодні умови (в першу чергу несприятливий зустрічний вітер), ресурс ходу РРС (з урахуванням необхідності повернення до депо для дозаправки) та ін. Обмеження представляють собою збільшену вагу ребер.

Для розв'язання додаткової задачі – задачі ретрансляції – є два шляхи. Першим шляхом, який розглянутий в даній роботі, є розв'язання задачі маршрутизації без урахування необхідності ретрансляції. Після цього другим етапом роботи алгоритму визначається, які РРС на якій ділянці потребують ретрансляції сигналів керування та/або руху на автопілоті. Далі розв'язується окрема задача визначення зон потрібного місцезнаходження ретрансляторів та мінімізації їх кількості.

В подальшому буде розглянутий другий шлях – інтегральне розв'язання задачі маршрутизації з мінімізацією необхідних ретрансляцій в якості додаткового параметру.

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. Оскільки розмірність задачі є невеликою, можливе її розв'язання на звичайному портативному персональному комп'ютері за прийнятний час – для колективу малих БПЛА (3 одиниці) з дальністю до 25 км. Для середніх (125 км) і великих (200 км) – ця задача може розв'язуватись на сервері або спеціалізованих комп'ютерах.

Висновки

Створення спеціальної мережі для групи РРС, яку можливо розгорнути у польових умовах є актуальною науково-прикладною задачею. Щоб досягти максимуму ефективності РРС, особлива увага була приділена питанням моделювання та оптимізації управління групою БПЛА та БНР при виконанні поставленої задачі як єдиної команди.

Предметом розгляду також стала формалізація задачі маршрутизації ТЗ при необхідності обстеження певної території. Проблему зведено до задачі маршрутизації ТЗ з декількома депо із додатковими обмеженнями. Для класичної задачі відомі ефективні та швидкі алгоритми пошуку наближених розв'язків, що дозволить значно спростити розв'язування задачі маршрутизації ТЗ, яка є NP-складною задачею. В результаті виконання формалізації задачі маршрутизації ТЗ при необхідності обстеження певної території її було зведено до задачі маршрутизації ТЗ з декількома депо із додатковими обмеженнями.

Поширені комплекси імітаційного моделювання ґрунтуються на відомих концепціях, стандартах IEEE-1516, відкритих архітектурах (DIS, HLA) та відомих протоколах (DIS), що дозволяє поєднувати ці комплекси в єдині інформаційні структури (RTI) не зважаючи на рівень складності цього комплексу моделювання та його призначення.

При розробці єдиного інформаційного середовища для моделювання чарункових та Ad hoc мереж варто приймати досвід використання розроблених стандартів, відкритих архітектур та протоколів, більшість з яких є відкритими та безкоштовними.

Основними напрямками подальшої роботи по вдосконалюванню засобів імітаційного моделювання мереж керування групою РРС та АСУВ є:

- уніфікація опису відомостей, даних, інформації й протоколів взаємодії елементів системи управління;
- розробка системи забезпечення спільної поінформованості про обстановку, яка склалася, й на цій основі здійснення розподіленого управління, створення системи моделювання та підтримки прийняття рішень;
- створення єдиного інформаційного простору на основі інтеграції загальних даних і їхніх описів по видах функціональної діяльності на всіх рівнях (ланках) керування;

- завершення розробки і передача в дослідну експлуатацію на полігоні ЄАСУ програмного забезпечення для інтеграції засобів моделювання;
- створення власної HLA-подібної технології і реєстрація комплексу спеціальних програм, що реалізують дану технологію;
- постановка задачі оптимального управління для колективом PPC при відвідуванні заданої множини об'єктів та у випадку, коли конкретні об'єкти не задані;
- розробка набору алгоритмів захищеної передачі інформації у спеціальній мережі та дистанційного радіокерування БПЛА та БНР за шаблонами сценаріїв маневрів.

Також напрямом подальших досліджень є побудова моделі планування польотів груп БПЛА, які частину шляху пролітають на автопілоті та інтегральне розв'язання задачі маршрутизації з мінімізацією необхідних ретрансляцій в якості додаткового параметру. Ця задача є оригінальною, втім має певні аналогії із відомою задачею маршрутизації транспортних засобів.

Література

1. 1516.1-2010 IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA). Federate Interface Specification [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://standards.ieee.org/findstds/standard/1516.1-2010.html>
2. U.S. Defense Modeling and Simulation Office (2001). RTI 1.3-Next Generation Programmer's Guide Version 4. U.S. Department of Defense [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://hla-rti.wikispaces.com/file/view/RTI_NG13_Programmer+Guide.pdf
3. Standard: NATO - STANAG 4603 Modelling and Simulation Architecture Standards for Technical Interoperability: High Level Architecture (HLA) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://standards.globalspec.com/std/9901878/nato-stanag-4603>
4. Корольов В. Ю. Аналіз задачі маршрутизації для тактичних мереж сил спеціальних операцій / В. Ю. Корольов // Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика: Вісник університету «Україна». – 2015. – № 2(18). – С. 64–76.
5. Fujimoto R. The High Level Architecture: Introduction. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.acm-sigsim-mskr.org/Courseware/Fujimoto/Slides/FujimotoSlides-20-HighLevelArchitectureIntro.pdf>
6. Bjorn M. The HLA Tutorial a Practical Guide for Developing Distributed Simulations [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.pitchtechnologies.com/wp-content/uploads/2014/04/TheHLATutorial.pdf>
7. Корольов В. Ю. Захист інформації в корпоративних USB-флеш накопичувачах для хмарних обчислень / В. Ю. Корольов // Математичні машини і системи. – 2012. – № 2. – С. 60–69.
8. Glen D. Johnson Network Simulation with HLA AND MODSIM III [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.informs-sim.org/wsc99papers/155.PDF>
9. Run-time infrastructure (simulation) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [https://en.wikipedia.org/wiki/Run-time_infrastructure_\(simulation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Run-time_infrastructure_(simulation))
10. Гуляницький Л. Ф. Решение N-методом задачи оптимизации маршрутов транспортных средств с временными окнами / Л. Ф. Гуляницький, А. В. Самусь // Компьютерная математика. – 2012. – № 2. – С. 147–155.
11. Alireza R. A path relinking algorithm for a multi-depot periodic vehicle routing problem / R. Alireza, T. G. Crainic, M. Gendreau, W. Rei // Journal of Heuristics. – 2013. – № 19(3). – P. 497–524.
12. Cordeau J. F. A guide to vehicle routing heuristics / J. F. Cordeau, M. Gendreau, G. Laporte, J. Y. Potvin, F. Semet // Journal of the Operational Research society. – 2002. – P. 512–522.

Рецензія/Peer review : 17.1.2017 р.

Надрукована/Printed : 5.2.2017 р.
Рецензент : д.т.н. Гуляницький Л.Ф.