

¹Печурін М.К., д.т.н.,
orcid.org/0000-0003-1727-7455,

²Боярінова Ю.Є., к.т.н.,
orcid.org/0000-0002-8974-529X,

²Кондратова Л.П., к.т.н.,

²Воронін М.Г.,

¹Сіренко М.А.

МОДЕЛІ ТОПОЛОГІЙ СЛАБОВИПРОМІНЮЮЧОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ВЗАЄМОДІЮЧИХ БПЛА

¹Національний авіаційний університет

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

nkpech@i.ua,

ub@ua.fm,

ljupav@ukr.net,

maksym.strenko24@ukr.net

Вступ

Проблема підвищення ефективності застосування БПЛА є доволі актуальною, особливо якщо враховувати функції, які цей вид літальних апаратів виконує останнім часом, а також ціну за неефективне виконання цих функцій. Важливим фактором, що впливає на ефективність застосування БПЛА, є спосіб організації функціонування БПЛА і їх комплексів (наборів) як спеціального об'єкта комп'ютерної інженерії. Спосіб організації функціонування комплексів БПЛА, суть якого в системній інтеграції, тобто в переході від поодинокого (автономного) використання БПЛА, до використання їх в рамках системи взаємопов'язаних, інструментарієм побудови комп'ютерних систем, мереж та їх компонентів, – один з перспективних напрямків підвищення ефективності застосування БПЛА; при цьому ця перспектива відкрилась доволі давно, мабуть, з моменту появи самого об'єкту – безпілотного літального апарату (рис. 1).

В топології, представленій на рис. 1, маємо єдиний центр інтеграції (як правило – у наземному сегменті, що відповідає централізованій топології телекомунікаційної мережі), і взаємодія між функціонуючими БПЛА відбувається через цей центр. Інформаційні технології для такої

архітектури достатньо вивчені (типу рекомендацій IEEE 802.4) і широко застосовуються на практиці [1]. Суттєвою особливістю програмно-апаратного комплексу, що відповідає такій топології, є наявність, у наземному сегменті, достатніх інформаційно-обчислювальних ресурсів.

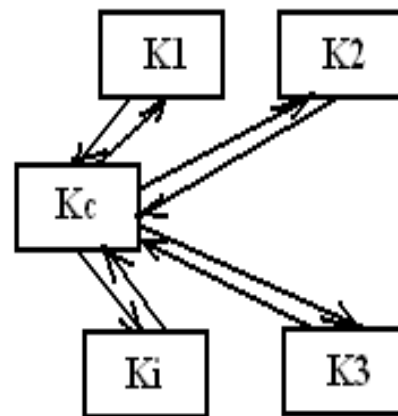


Рис. 1. Інтеграція комплексу БПЛА шляхом побудови наземної (в наземному сегменті) телекомунікаційної системи управління БПЛА.

Альтернативною представленою на рис. 1 топології, є топологія комп'ютерно-телекомунікаційної мережі з компонентами, розміщеними на борту функціонуючих БПЛА, тобто в повітряно-космічному сегменті. З точки зору моделювання врахування інформаційно-обчислювальних можливостей комп'ютерного обладнання,

забезпечуючого інтеграцію взаємодіючих БПЛА, доцільно, на думку авторів, здійснювати не шляхом включення відповідних параметрів у єдину нормативну модель, а апіорною декомпозицією з виділенням актуального предмету моделювання – процесу взаємодії компонентів комп'ютерної мережі, які мають суттєво обмежені ресурси, необхідні для інтеграції БПЛА у єдину систему шляхом налагодження безпроводової передачі даних у повітряно-космічному сегменті [2].

У фокусі представленої статті знаходиться процес взаємодії БПЛА легкого класу, де маємо суттєві обмеження на потужності прийомо-передаючого обладнання, яке використовується для налагодження (безпроводового) зв'язку. Така телекомунікаційно-комп'ютерна система може бути класифікованою як локальна, відповідні інформаційні технології відрекомендовані в стандартах IEEE 802.x, починаючи з 802.3, 802.4, 802.5, а також зокрема – в стандартах IEEE 802.11b, 802.15.1, 802.15.4 (рис. 2).

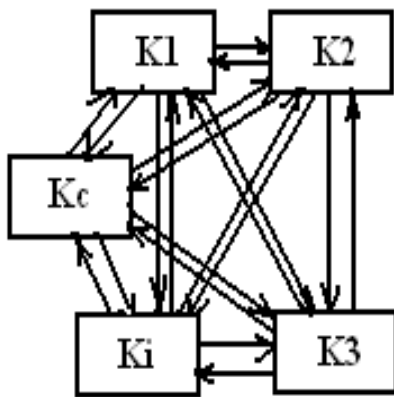


Рис. 2. Топологія телекомунікаційної мережі від IEEE 802.15.1 [3].

Потужність передавачів прийомо-передаючого обладнання, встановленого на борту БПЛА, не перевищує 20 dBm, а діаметр моделюючого (зваженого) графу відповідної телекомунікаційної системи характеризується діаметром до сотень метрів [4]. Топологія такого масштабу дозволяє будувати телекомунікаційну мережу згідно з вище відміченими рекомендаціями, які, зокрема, враховують обмеженість інформаційно-обчислювальних ресурсів

порадою (розумного) скорочення, у порівнянні з останніми Еталонної моделі взаємодії відкритих систем, переліку рівневих функцій і сервісів

В представленому на рис. 2 варіанті топології бездротової мережі «піднет» центральному (-ним), координуючому виконання функцій комплексом БПЛА, комп'ютеру (компоненту) надається статус «мастер» (*master*), а інші комп'ютери (компоненти) набувають статусу «підлеглий» (*slave*); при цьому зв'язок між останніми відбувається через комп'ютер із статусом «мастер».

Топології, наведені на рис. 1 та рис. 2, можуть бути класифікованими як централізовані: обмін даними між компонентами (БПЛА) відбувається через центральний вузол; при цьому у варіанті, наведеному на рис. 1, маємо вузол (-ли), розміщений у наземному сегменті.

Слід відмітити, що яка б топологія і відповідна інформаційно-телекомунікаційна технологія не застосовувалась, користь від інтеграції компонентів, надання можливостей для оперативного обміну інформацією в рамках інтегрованої системи, може бути нівельованою збільшенням ймовірності порушення функціонування БПЛА за рахунок демаскування з причини зростання інтенсивності електромагнітного випромінювання, яке генерується прийомо-передавальним обладнанням для налагодження комунікацій між компонентами. Зростання інтенсивності радіовипромінювання підвищує ймовірність виявлення БПЛА в умовах протидії і знижує ймовірність ефективного виконання комплексом (роєм БПЛА) своїх функцій.

В опусі пропонуються нормативні моделі топологій телекомунікаційної системи взаємодіючих БПЛА, використання яких (моделей) дозволить визначати параметри топологій, що вони (опосередковано) підвищують ймовірність виконання беспілотними апаратами основної функції за рахунок мінімізації ймовірності демаскування рою БПЛА під час періоду взаємодії. Тобто маємо на меті побудувати нормативні моделі, де маємо кілька (не одну)

критеріальних (цільових) функцій. Серед цих функцій необхідними є критеріальна функція з цільовим оператором мінімізації рівня демаскуючого електромагнітного випромінювання і критеріальна функція з цільовим оператором максимізації максимального рівня інтеграції.

Стаття присвячена розробці адекватних і легкодсліджуваних нормативних моделей інтегрованих систем малопотужних БПЛА, які дозволять відшукувати (вибирати) оптимальну топологію комп'ютерно-телекомунікаційної мережі та, опосередковано, - тип ефективної інформаційної технології, в свою чергу дозволяючи підвищити ймовірність якісного виконання функцій комплексом БПЛА за рахунок зростання ступеня інтеграції та одночасно при зменшенні ймовірності демаскування шляхом зменшення інтенсивності радіовипромінювання прийомо-передаючого обладнання – компонентів комплексу взаємодіючих БПЛА.

Постановка задачі

Маємо дані про поточне (миттєве) розташування кожного з m компонентів, розміщених на взаємодіючих БПЛА, в ролі яких (компонентів) можуть виступати локальні програмно-апаратні засоби обробки інформації, розміщені в одному з вузлів традиційної комп'ютерної мережі, або вони ж, розміщені в одному з вузлів нейрокомп'ютерної мережі, наприклад, архітектури Хопфілда [5]. Компоненти зорієнтовані у тривимірному просторі; це зокрема, можуть бути задані географічні координати: широта, довгота, висота над рівнем моря, а також інші характеристики каналів, асоційованих з даним (шум, завади, перешкоди, прогнозований трафік, несуча частота, ширина полоси частот тощо). Згадане породжує вектори узагальнених відстаней між парами компонент, при цьому географічна відстань суть базова компонента вектору відстані. Питання способу отримання цієї інформації лежить поза межами даної статті. Маємо також (допоміжний) інструмент скаляризації даних векторів, в основі якого можуть лежати способи, які застосовуються

для розв'язання цієї задачі при корегуванні маршрутних таблиць, наприклад, в комп'ютерних мережах ТСП/ІР; цим підходом може бути виділення головної компоненти вектору або адитивна згортка. В результаті формується матриця L поточних скаляризованих відстаней (далі – відстаней) між парами БПЛА.

Концептуально необхідно запропонувати моделі, аналіз яких дозволить застосувати відповідні інформаційно-телекомунікаційні технології для комплексу функціонуючих БПЛА, відстань між парами яких представлена матрицею L , при забезпеченні максимальної (підвищеної) ймовірності виконання ними своїх функцій за рахунок можливості обміну даними в інтегрованій системі і в умовах протидії.

Основним параметром, який визначає кількісні значення вищенаведених критеріїв (з більшою чи меншою ступінню опосередкованості), є потужності прийомо-передавального обладнання інтегрованого комплексу БПЛА. Вибір цього показника в якості одного з відшукваних моделює натуральне протиріччя критеріїв: із збільшенням потужності прийомо-передавачів значення показника захищеності системи від демаскування зменшується у кількісному вираженні, а інтегрованість системи збільшується. Відшуквані топологічні характеристики слабовипромінюючої телекомунікаційної системи функціонуючих БПЛА представляються матрицею $X = [x_{ij}]$ і пов'язаною з нею матрицею $P = [p_{ij}]$, де $x_{ij}=1$, якщо зв'язок, тобто налагоджений однонаправлений (симплексний) канал від i до j організовано (за допомогою прийомо-передаючого обладнання потужністю p_{ij}), $x_{ij}=0$, якщо зв'язок від i до j відсутній ($p_{ij}=0$).

Розв'язання задачі

Розв'язання задачі, по суті, – це визначення топологічних моделей і відповідних методів їх аналізу; при цьому виокремимо топології з розташуванням управляючого вузла в наземному сегменті та топології розташування його на борту одного з БПЛА.

Розв'язання задачі: критеріальна частина нормативних моделей

Як це було вже сказано, синтезовані моделі повинні враховувати такі критерії ефективності:

- максимальна захищеність системи від демаскування, тобто мінімальна ймовірність виявлення, зовнішніми засобами, трафіку між БПЛА в радіоєфірі, що (демаскування) може привести до зменшення ймовірності виконання основних функцій комплексом БПЛА;

- максимальна інтегрованість системи, тобто максимальна ступінь зв'язності моделюючого топологію телекомунікаційної системи графу, що забезпечить максимальну ймовірність виконання функцій комплексом БПЛА за рахунок збереження цілісності (інтеграції) і забезпечення необхідного міжкомпонентного трафіку.

Наявність двох (не одного) критеріїв, що протирічать один одному, не дозволяють побудувати коректну, в математичному сенсі, нормативну модель на основі наявних вихідних даних, – є потреба у залученні додаткової інформації.

Протиріччя породжується (очевидним) фактом, що значення ймовірності виявлення трафіку інтегрованого комплексу БПЛА, яке повинне мінімізуватись, є зростаючою функцією потужності електромагнітного випромінювання від прийомо-передаючого обладнання компонентів мережі PEV, а ступінь інтегрованості SIS, яке доцільно максимізувати – неспадаючою функцією PEV.

Тобто цільові оператори є такими:

[Ймовірність виявлення трафіку інтегрованого комплексу БПЛА] $(PEV) \rightarrow \min$;

[Ступінь інтегрованості системи] $(PEV) \rightarrow \max$.

Серед усіх способів розв'язання цієї некоректної, в математичному сенсі, задачі з невизначеністю в критеріях пропонується вибрати спосіб, який свого часу академік

Нікіта Миколайович Моїсеєв називав "методом контрольних значень".

Припущення. Відшукування мінімальної ймовірності виявлення трафіку інтегрованого комплексу БПЛА еквівалентно відшукуванню мінімального значення PEV .

При прийнятті даного припущення може бути запропонована така Канонічна нормативна модель.

Функція мети:

$$PEV \rightarrow \min \quad (1)$$

Критеріальне обмеження:

$$SIS(PEV) \geq SIS(PEV)^{\min}. \quad (2)$$

Для подальшої деталізації (1)-(2) і переходу до конструктивної моделі вводимо наступне припущення.

Припущення: відшукування мінімального значення PEV еквівалентно відшукуванню мінімального значення $\sum_i \sum_j P_{ij}$.

Прийняття цього припущення дозволяє так переписати (1):

$$\sum_i \sum_j p_{ij} \cdot x_{ij} \rightarrow \min,$$

де p_{ij} – потужність прийомо-передавального обладнання, необхідного для організації каналу зв'язку (i, j) , відстань між якими суть l_{ij} .

Припущення. Відшукування мінімального значення $\sum_i \sum_j p_{ij} \cdot x_{ij}$ еквівалентно відшукуванню мінімального значення $\sum_i \sum_j l_{ij} \cdot x_{ij}$.

Тоді (1) набуває вид:

$$\sum_i \sum_j l_{ij} \cdot x_{ij} \rightarrow \min.$$

Для кількісної оцінки $SIS(PEV)^{\min}$ використовуємо ступень (реберної) зв'язності відповідного графу. Тоді для формалізації (критеріального) обмеження (2) вводимо

Припущення: ступінь інтегрованості системи набуває мінімально допустимого значення $SIS(PEV)^{\min}$, якщо між кожною парою вузлів графової моделі існують щонайменше k незалежних шляхи.

Іншими словами, представивши ступінь інтегрованості системи ступенем реберної зв'язності відповідного графу, і припустивши, що мінімальне значення цього показника суть k , маємо такий, відомий з часів Роберта Басакера (Robert G. Busacker) та Томаса Сааті (Thomas L. Saaty) простий алгоритм перевірки виконання умови (2).

1. Формування $X^0 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{(m-1)} X^i$.

2. Якщо в матриці X^0 всі елементи не менше k , то умова (2) виконується.

В залежності від заданих значень k маємо наступні конструктивні нормативні моделі топологій слабвовипромінюючих телекому-нікаційних систем взаємодіючих БПЛА.

Модель 1 ($k = 1$)

$$\sum_i \sum_j l_{ij} \cdot x_{ij} \rightarrow \min,$$

де X є допустимим, якщо маємо позитивний результат перевірки виконання умови (2) алгоритмом для $k=1$.

Модель 2 ($k = 2$)

$$\sum_i \sum_j l_{ij} \cdot x_{ij} \rightarrow \min,$$

де X є допустимим, якщо маємо позитивний результат перевірки виконання умови (2) алгоритмом для $k=2$.

Інструментарій для дослідження конструктивних нормативних моделей 1 та 2

Для моделі 1 відшукування розв'язань може бути зведеним до генерації допустимих варіантів топологій (умова (2)), розрахунку значень (1) та процедури пошуку варіанту з найкращим значенням (1). Маємо модель, яку можна класифікувати як модель задачі цілочисельного нелінійного програмування з неформалізованими умовами – обмеженнями.

В разі встановлення більш жорсткого обмеження в (2) шляхом заміни відношення \geq на $=$, тобто відкидання варіантів топологій із кількістю шляхів між довільними парами, що перевищують 1, маємо модель, яку можна класифікувати як модель класичної задачі комівояжера з існуючим на сьогодні (i на вчора [6]) потужним інструментарієм (методами та алгоритмами) розв'язання. Приклад топології наведено на рис.3, а відповідна інформаційна технологія відрекомендована, напр. – в IEEE 802.5.

В разі недоцільності відкидання таких "надлишкових" варіантів можна, для задач невеликої розмірності, застосовувати генетичні алгоритми із спрощеними (економними) реалізаціями процесу кросовера в нескінченному просторі [7]. Прикладом такого економного підходу може

бути застосування для кросовера пошукові процедури типу покоординатного спуску [8].

В разі наявності дуплексних каналів маємо модифіковану модель 1, яку можна класифікувати як модель класичної задачі відшукування найкоротшого зв'язуючого дерева з відповідним інструментарієм для розв'язання [9].

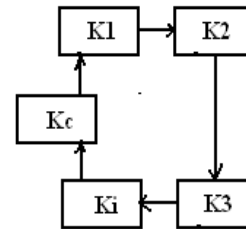


Рис. 3. Приклад топології з $k = 1$, як результат розв'язання задачі комівояжера.

Для моделі 2 відшукування розв'язань може бути зведеним до генерації допустимих варіантів топологій (умова (2)), розрахунку значень (1) та процедури пошуку варіанту з найкращим значенням цільової функції. Маємо модель, яку можна класифікувати як модель задачі цілочисельного нелінійного програмування з неформалізованими умовами – обмеженнями.

В разі встановлення більш жорсткого обмеження в (2) шляхом заміни відношення \geq на $=$, тобто відкидання варіантів топологій із кількістю шляхів між довільними парами, що перевищують 2, маємо модифікацію моделі задачі комівояжера.

Висновки

1. Врахування обчислювальних можливостей комп'ютерного обладнання, забезпечуючого інтеграцію взаємодіючих БПЛА, з включенням відповідних параметрів у єдину нормативну модель, можливо і доцільно, з метою спрощення моделі, здійснити апріорною класифікацію з виділенням об'єкту моделювання - взаємодіючі апаратів з обмеженими інформаційно-обчислювальними ресурсами.

Пропонується в якості формальної моделі для дослідження використовувати нормативну модель типу моделі задачі комівояжера.

2. Допускається, в якості алгоритмів розв'язання задачі (дослідження моделі) використовувати алгоритми типу генетичних, основані на використанні простої процедури кросовера, що базується на класичних пошукових алгоритмах типу покоординатного спуску.

3. Доцільно, для захисту інтегрованої системи БПЛА від демаскування, використовувати класичну відпрацьовану (в сенсі – досконалу) інформаційну технологію типу Token Ring IEEE 802.5. Така відносно проста, не потребує великих обчислювальних ресурсів, що є суттєвим для інтеграції БПЛА легкого класу, інформаційна технологія захищає комплекс взаємодіючих БПЛА шляхом зменшення потужності електромагнітних випромінювань системи безпроводової передачі даних при задовільному рівні інтегрованості комп'ютерної мережі.

4. Розроблені нормативні моделі є інваріантними до способу передачі енергії між взаємодіючими БПЛА, і тому їх можна і доцільно застосовувати для пошуку альтернативних методів інтеграції, альтернативних існуючим методам представлення (кодування) інформації, що вона передається між компонентами мережі БПЛА в умовах обмеженості інформаційно-обчислювальних ресурсів.

Література

1. Internetworking Technologies Handbook. – [Forth Edition]. – Cisco Systems, et al. – Cisco Press, 2005. – 1040 p.

2. Жуков І.А., Печурін М.К., Кондратова Л.П., Печурін С.М. Розподіл ресурсів в обчислювальному кластері для БПЛА // Проблеми інформатизації та управління: зб. наук. праць. – 2016. – Вип.3 (55). – С. 34-38.

3. IEEE Standard for Information technology. Telecommunications and information

exchange between systems. Local and metropolitan area networks. Specific requirements. Part 15.1: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for wireless personal area networks (WPANs). IEEE Computer Society, 14 June 2005. URL: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.1-2005.pdf>.

4. Roshan P., Leary J. 802.11 Wireless LAN Fundamentals. – М.: Publishing house "Williams", 2004. – 304 p.

5. Sineglazov V., Chumachenko O., Gorbatiuk V. Forecasting aircraft miles flown time series using a deep learning-based hybrid approach // Aviation. – 2018. – Issue 22. – No. 1. – P. 6-12.

6. Little J.D.C., Murrty K.G., Sweeney D.W., Karel C. An algorithm for the travelling salesman problem // Operation Resoutce. – 1963. – Vol.11. – No. 6.

7. Чемерис О.А., Сушко С.В. Методи штучного інтелекту при оптимізації роботи мікропроцесорних систем // Комп'ютерні системи та мережні технології: тези доповідей XII Міжнародної науково-практичної конференції CSNT-2019, Київ, 28–30 березня 2019 року. – К., 2019. – С. 127-129.

8. Taylor G., Burmeister R., Xu Z., Singh B., Patel A., Goldstein T. Training neural networks without gradients: A scalable admm approach. arXiv:1605.02026v1, 2016.

9. Боярінова Ю.Є., Воронін М.Г. Ефективний спосіб організації телекомунікацій в спеціалізованій комп'ютерній мережі рухомих об'єктів // Прикладна математика та комп'ютинг: збірник тез доповідей XV наукової конференції молодих вчених ПМК-2022, Київ, 16-18 листопада 2022. – С. 209-213.

Печурін М.К., Боярінова Ю.Є., Кондратова Л.П., Воронін М.Г., Сіренко М.А.

МОДЕЛІ ТОПОЛОГІЙ СЛАБОВИПРОМІНЮЮЧОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ВЗАЄМОДІЮЧИХ БПЛА

В опусі пропонуються нормативні моделі топологій телекомунікаційної системи взаємодіючих БПЛА, використання яких (моделей) дозволить визначати параметри

топологій, що вони (опосередковано) підвищують ймовірність виконання безпілотними апаратами основної функції за рахунок мінімізації ймовірності демаскування рою БПЛА під час періоду взаємодії. При моделюванні введено припущення, що мінімізація ймовірності демаскування досягається виключно за рахунок мінімізації сумарної потужності каналоутворюючого прийомо-передаючого обладнання. Аналіз запропонованих моделей дозволить застосовувати відомі ресурсозберігаючі апаратно-програмні засоби (на кшталт описаних в рекомендаціях IEEE 802.15.1, а також 802.3, 802.4, 802.5, ITU X.25), придатні для застосування в розрахованих топологіях слабовипромінюючих телекомунікаційних системах взаємодіючих БПЛА. Виникаючу критеріальну невизначеність розв'язано класичним способом виокремлення головного критерія, в якості якого вибрана мінімальна сумарна потужність каналоутворюючого прийомо-передаючого обладнання, з формуванням критеріальних обмежень. В якості контрольних значень рівня інтегрованості використано ступінь зв'язності зваженого графа, що моделює взаємозв'язок в бездротовій системі передачі даних. Введення ряду припущень дозволило використати класичні моделі задачі комівояжера та відшукування найкоротшого зв'язуючого дерева у зваженому графі, методи аналізу яких відшукано в класі цілочисельного програмування з додатковими логічними умовами.

Ключові слова: комп'ютерна мережа, безпілотні літальні апарати, захищеність, багатокритеріальність, електромагнітне випромінювання, задача комівояжера, мінімальне зв'язувальне дерево, IEEE 802.x, ITU X.25.

Pechurin M.K., Boyarinova Yu.Ye., Kondratova L.P., Voronin M.G., Sirenko M.A.

MODELS OF THE TOPOLOGIES FOR THE WEAK-EMITTING TELECOMMUNICATION SYSTEM OF INTERACTING UAVS

In this opus there are offered the normative models of the topologies for the telecommunication system of interacting UAVs, using of which (models) will allow to determine the parameters of topologies that (indirectly) increase the probability to perform by the unmanned aerial vehicles the main function due to minimization of the UAVs swarm unmasking probability during the interaction period. In the modeling, it was made an assumption about the minimization of the unmasking probability which is achieved solely due to the minimization of the channel-forming receiving and transmitting equipment total power. Analysis of the proposed models will allow the use of well-known resource-saving hardware and software tools (such as those described in the IEEE 802.15.1 recommendations, as well as 802.3, 802.4, 802.5, ITU X.25), suitable to use in calculated topologies for the weak-emitting telecommunication systems of interacting UAVs. The emerging criterion uncertainty is solved by the classic method to identify the main criterion, which is chosen as the minimum total power of the channel-forming receiving and transmitting equipment, with forming the criteria restrictions. The weighted graph connectivity degree, modeling the relationship in the wireless data transmission system, was used as the control values of the integration level. The introduction of an assumptions number made it possible to use the classical models of the traveling salesman task and finding the shortest connecting tree in a weighted graph, the methods of analysis for which were found in the integer programming class with additional logical conditions.

Keywords: computer network, unmanned aerial vehicles, security, multicriteria, electromagnetic emitting, traveling salesman's problem, minimum spanning tree, IEEE 802.x, ITU X.25.