

О. Г. Лебедєв, О. В. Бондар, Є. О. Самойленко, В. Г. Черевко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ ДО РОЗРАХУНКУ КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ ЖИВУЧОСТІ DRONES

Анотація. На сьогоднішній день живучість відображає стійкість до деструктивних впливів як окремих підсистем drone, так і drone загалом. Така живучість закладена в алгоритмічну частину підсистем drone і дозволяє у разі виникнення нештатних ситуацій змінювати послідовність роботи підсистем drone. При вирішенні задачі аналізу та синтезу елементів підсистем drone, оперують кількісною оцінкою живучості. Це необхідно для визначення, з якою ймовірністю відмови окремих елементів будь-якої підсистеми drone призведуть до пошкодження drone. В даний час серед розробників drones не існує єдиної думки для визначення кількісної оцінки живучості drones. Дуже багато залежить від архітектури підсистем drone, їх взаємодії між собою та взаємодії їх елементів між собою. Ця стаття присвячена дослідженню підходів до розрахунку кількісної оцінки живучості drones на етапі проектування.

Ключові слова: «Swarm-bot» - system, «s-bot», живучість, безпека, надійність, невразливість, стійкість, реінжиніринг, комунікація, nano-drone.

Вступ

Постановка проблеми. Останнім часом з'явився термін drone, що означає відсутність пілота на його борту (рис. 1). Це вимагає від drone певної автономності.



Рис. 1. Приклад drone

Фундаментальним у концепції автономії є розуміння відмінностей у базових термінах: автоматичні drones; автономні drones [1]. Автоматичні drones вміють самостійно досягати поставленої мети, дотримуючись запрограмованої логіки. Автономні drones спроможні самостійно впоратися з позаштатними ситуаціями, підключаючи заздалегідь запрограмований набір правил, який допомагає їм зробити правильний вибір. Прийнято виділяти чотири базові рівні автономії для drones [2].

Перший рівень автономії - контрольований та керований оператором drone. У такому drone оператор приймає всі рішення щодо функціонування drone. Такий drone не здійснює автономного контролю physical environment. Другий рівень автономії - контрольований, але не керований оператором drone. Такий drone може виконувати поставлені перед ним завдання, коли оператор дає drone певні дозволи. У такому режимі drone може ініціювати певні дії на основі даних, одержаних від бортових сенсорів. Ініціація може відбуватися лише у межах виконання поточного завдання. Третій рівень автономії - повноваження оператора делеговані drone. Такий drone може виконувати поставлені завдання, які не залежать від контролю оператором. При такому режимі drone виконує поставлені перед ними завдання без додаткової участі оператора. Прикладами такого режиму є: керування двигуном

drone; автоматичне керування drone, яке має бути активоване або деактивоване оператором drone. Четвертий рівень автономії - це повністю автономний drone. Такий drone приймає команди, що вводяться оператором, і переводить їх у конкретні завдання без подальшої взаємодії з оператором. Але у разі виникнення нештатної ситуації оператор може втрутитися в процес виконання drone поставленого завдання.

При визначенні до якого класу належить drone, одними з базових показників є розмір та вага drone.

Сучасні технології дозволили drones знаходитися в дуже широкому діапазоні розмірів і являти собою або невелику комаху з вагою в кілька грам - сучасний nano-drone (рис. 2), або бути порівнянним з проектом повноцінного комерційного літака з вагою сотні кілограм.



Рис. 2. Приклад nano-drone

Виходячи з цього, при визначенні класу drone додали такі параметри, як встановлений на drone двигун і джерело енергії, що використовується цим двигуном. Ці параметри впливають на:

- величину корисного навантаження, яке можна встановити на drone;
- радіус дії drone.

В даний час виділяють чотири базові джерела енергії, які використовуються двигунами drone:

- стандартне авіаційне паливо;
- багатозарядні акумуляторні батареї;
- базові паливні елементи;
- високотехнологічні сонячні панелі.

Авіаційне паливо використовується в drone, який можна порівняти з повноцінними комерційними літаками. Приклад такого drone є drone Predator (рис. 3).



Рис. 3. Приклад drone Predator

Багатозарядні акумуляторні батареї в основному використовуються в nano-drones. Такі nano-drones мають малий радіус дії і в основному призначені для проведення розвідувально-рятувальних операцій, що робить їх ефективними помічниками. Базові паливні елементи, які використовуються двигунами drones - це пристрої, що виконують перетворення фізичної енергії з одного стану в інший. Таке перетворення відповідає вимогам green energy. Однією з переваг використання базових паливних елементів є великий радіус дії drones, а відповідно і час польоту. Наприклад, drone Stalker, в якому використовується базовий паливний елемент, може виконувати поставлені перед ним завдання протягом 10 годин, замість 1.5 години при використанні nano-drone на акумуляторах. Використання високотехнологічних сонячних панелей у сучасних drones в даний час зустрічається рідко. Проте, останні досягнення у галузі високих технологій та вимоги green energy, дозволили світовим компаніям Google та Facebook вкласти свої гроші в дослідні проекти з експериментального виробництва drones з використанням високотехнологічних сонячних панелей. На сьогодні завдання, які вирішуватимуть такі drones, це надання бездротового підключення користувачів до високошвидкісної мережі Internet у важкодоступних місцях [3]. Перевагами таких drones є можливість тривалий час перебувати в повітрі і не забруднювати physical environment. При виконанні аналізу поставлених завдань перед drones, до складу якої входять drones, порівняні з проектом повноцінного комерційного літака з вагою в сотні кілограм, була виявлена можливість виникнення нештатних ситуацій, обумовлених відмовами функціональних підсистем таких drones. Традиційно стійкість технічних систем до виникнення нештатних ситуацій обумовлюється властивістю надійності та передбачає дублювання окремих бортових підсистем [3]. Однак, для підсистем drones даний підхід не застосовується через обмеження за масою, габаритами та обчислювальними можливостями. В даний час розробниками у підсистемах drone використовується функціональна надмірність. Вона дозволяє відбивати наслідки позаштатних ситуацій з допомогою реконфігурації. Тому при проектуванні drones, розробники застосовують підсистеми з програмованою логікою та структурою, що перебудовується. Реконфігурація дозволяє забезпечити функціонування drones у разі виникнення нештатних ситуацій. Реконфігурація дає можливість забезпечити живучість drone та виконати поставлені перед ним завдання у разі виникнення нештатних ситуацій [3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Колективом дослідників – Barabash O., Tverdenko H.,

Sobchuk V., Musienko A., Lukova-Chuiko N. були опубліковані результати, які показують, що при появі зовнішніх або внутрішніх деструктивних впливів на «Swarm-bot» systems Найбільш ефективним рішенням для досягнення поставленого завдання (підвищення живучості) є застосування одночасно групи інтелектуальних мобільних «s-bots», що входять до складу одної «Swarm-bot» system [4]. Провідними вченими України – Dodonov, A.G., Gorbachuk, O.S., Kuznietsova, M.G., опубліковано роботи, з яких видно, що при використанні інтелектуальних мобільних «s-bots», оснащених автономною системою пересування та навігації та здатних до виконання певних функцій, виникають складні завдання, пов'язані насамперед із проблемою управління такими засобами та організацією колективної їх взаємодії для найбільш ефективного досягнення поставленого завдання [5].

Мета статті. Провести дослідження підходів до розрахунку кількісної оцінки живучості drones на етапі проектування.

Виклад основного матеріалу

Огляд розрахунку кількісної оцінки живучості drones. В даний час термін живучість включає в себе два базові параметри: надійність та безпека. Живучість як окремих підсистем drone, так і drone загалом характеризується базовими властивостями: невразливістю; стійкістю; реінжинірингом. Тому можна з упевненістю сказати, що живучість відображає стійкість до деструктивних впливів як окремих підсистем drone, так і drone загалом [6]. Така живучість закладена в алгоритмічну частину підсистем drone і дозволяє у разі виникнення нештатних ситуацій змінювати послідовність роботи підсистем drone [7]. При вирішенні задачі аналізу та синтезу елементів підсистем drone, оперують кількісною оцінкою живучості [8]. Це необхідно для визначення, з якою ймовірністю відмови окремих елементів будь-якої підсистеми drone призведуть до пошкодження всього drone [9]. В даний час серед розробників drones не існує єдиної думки для визначення кількісної оцінки живучості drones [10]. Багато залежить від архітектури підсистем drone. Їх взаємодії між собою та взаємодії їх елементів, між собою [11].

Перший підхід до розрахунку кількісної оцінки живучості drones. Розглядаючи кількісну оцінку живучості drone в цілому, враховують особливості архітектури підсистем drone та їх взаємодії між собою. Досліджується зміни станів підсистем drone у часі: перший стан – початковий стан підсистем drone – S_S та початковий момент часу – $t_S - S_S(t_S)$; другий стан – кінцевий стан підсистем drone – S_D та кінцевий момент часу – $t_D - S_D(t_D)$.

При виникненні деструктивної дії I_N на підсистему drone, може призвести до того, що запланований кінцевий стан S_D не буде досягнуто. При цьому підсистеми drone опиняться у поточному стані $S_T(t_T)$. Така ситуація може виникнути, коли почнуть послідовно відмовляти підсистеми drone. У такому випадку живучість drone характеризується

максимальною кількістю елементів, які відмовили, що входять до складу підсистем drone – E_{NW} , після яких зберігається працездатність drone:

$$G = \max_{\prod_S} (E_{NW}), \quad (1)$$

де E_{NW} – кількість елементів, які відмовили та входять до складу підсистем drone.

Другий підхід до розрахунку кількісної оцінки живучості drones. При розрахунку кількісної оцінки живучості drone враховується функціональний підхід, тому що підсистеми drone характеризуються: переліком виконуваних завдань; цільовим функціоналом; безліччю елементів. Елементи підсистем drone можуть знаходитись у трьох базових станах: в робочому стані; не робочому стані; частково робочому стані. Тоді здатність drone до функціонування, після деструктивного впливу, залежить від вимог, що висуваються до виконуваних завдань. У загальному переліку розробники drone виділяють такі вимоги: вимога перша – необхідно виконати всі завдання, навіть якщо це призведе до втрати якості виконання; вимога друга – виконати пріоритетні завдання; вимога третя – виконати одне з базових завдань.

Вимога перша. Визначається розрахункове значення ефективності функціонування drone – W , яке розраховується залежно від специфіки роботи drone.

Вимога друга. Визначається кількість пріоритетних завдань $task_{priority}$, виконуваних drone в умовах виникнення відмов елементів підсистем drone по відношенню до базової кількості завдань – $task$:

$$G = \frac{task_{priority}}{task}, \quad (2)$$

Вимога третя. Виконати одну з базових задач, поставлених перед drone, при виникненні відмови хоча б одного елемента, що входить до складу підсистем drone:

$$G = P_{subsystem} / P_{element}, \quad (3)$$

де $P_{subsystem}$ – ймовірність відмови підсистеми drone; $P_{element}$ – ймовірність відмови елемента, що входить до складу підсистеми drone.

Третій підхід до розрахунку кількісної оцінки живучості drones. Розробниками drones оцінюється мінімальна кількість зв'язків між елементами, які входять до складу підсистем drone і які необхідно розірвати, щоб drone припинив виконувати поставлені перед ним завдання:

$$G = \min_{\prod_S} (L_E : W_T = 0), \quad (4)$$

де L_E – зв'язок між елементами, що входять до складу підсистем drone; W_T – ефективність функціонування drone в даний момент часу – t_T .

Четвертий підхід до розрахунку кількісної оцінки живучості drones. Розробниками drones розглядається логіко-ймовірнісний підхід до оцінки живучості. Безпосередньо виділяється бінарна логіка

функціонування підсистем drone та її елементів. Сам drone описується за допомогою математичного апарату – статичної моделі, а функціональні зв'язки між елементами, що входять до складу підсистем drone, представляються за допомогою алгебри логіки. Оцінку живучості розробники drones виконують за допомогою імітаційного моделювання, задаючи різні комбінації відмов елементів, що входять до складу підсистем drone. Після цього проводяться обчислення логічної функції, за результатами яких визначається здатність drone виконувати поставлені перед ним завдання. Далі розробники drones визначають безліч, яка складається з елементів, що відмовили – E_{NW} . Така безліч E_{NW} впливає на якісне виконання поставлених перед drone завдань, тому ці відмови називаються – критичними. Тоді показником живучості можна вважати, як ймовірність збереження drone здатності виконувати поставлені перед ним завдання при k -кратному виникненні відмов і розрахована як відношення E_{NW} кількості відмов елемента, що призвело до порушення роботи drone, до загальної кількості відмов $E_{\sum NW}$ цього елемента:

$$G = \sum_{i=1}^N \frac{k_i(1 - E_{NW})}{E_{\sum NW}}, \quad (5)$$

де k_i – ваговий коефіцієнт; E_{NW} – кількість елементів, які відмовили та входять до складу підсистем drone; $E_{\sum NW}$ – загальна кількість відмов цього елемента.

Сучасний підхід до розрахунку кількісної оцінки живучості drones. В даний час розробниками складних технічних систем запропоновано більш простий підхід до обчислення кількісної оцінки живучості як підсистем drone, так і самого drone. У такій послідовності дій необхідно знати, чи підсистеми drone зможуть виконувати базовий набір функцій при виникненні деструктивного впливу. Для цього розробники drone на етапі проектування закладають у проект drone функціональну надмірність, для того щоб при виникненні деструктивного впливу drone не вийшов з ладу. Тоді можна говорити про те, що drone виконає в повному обсязі поставлені перед ним завдання, тобто про не повний вихід підсистем drone з ладу, а відтак і кількість працездатних елементів – E_W , що входять до їх складу. Тому, при обчисленні кількісного показника живучості drone, в даний час розробники використовують відношення ефективності функціонування drone в поточний момент часу – $W_T(t_T)$, до ефективності функціонування drone у початковий момент часу – $W_0(t_0)$:

$$G(t) = W_T(t_T) / W_0(t_0), \quad (6)$$

де W_T – ефективність функціонування drone в поточний момент часу – (t_T); W_0 – ефективність функціонування drone у початковий момент часу – (t_0). Тоді для математичної моделі, яка дає можливість обчис-

лення кількісного показника живучості drone, формується такий перелік припущень та обмежень:

- кількісний показник ефективності функціонування елементів, що входять до складу підсистем drone, визначається на основі базових характеристик елемента – E_W ;

- математична модель, яка дає можливість обчислення кількісного показника живучості drone актуальна, доки не виникне відмова елементів – E_{NW} , що входять до складу підсистем drone. Потім математична модель піддається коректуванню.

Виходячи з переліченого переліку припущень та обмежень, обчислення кількісного показника живучості drone виконується на базі аналізу якісного виконання всіх поставлених перед drone завдань. При цьому визначення ефективності функціонування drone W_T у поточний момент часу (t_T) обчислюється знаходженням добутоків показників ефективності виконання поставлених перед drone завдань для загальної кількості працездатних елементів E_W , що входять до складу підсистем drone.

Висновки

Підсистеми drone, та й сам drone, являють собою складну технічну систему з програмованою логікою та структурою функціонування всіх елементів, що перебудовується. Завдяки програмованій логіці, закладений в елементи алгоритм роботи підсистем drone, дозволяє якісно виконувати поставлені перед drone базові завдання. При цьому алгоритми, які існують для кількісної оцінки живучості, включають різні сутності опису підсистем drone, як складної системи. В даний час розробниками drone запропоновано виконувати кількісну оцінку живучості drone, яка базується на аналізі ефективності роботи елементів, що входять до складу підсистем drone, при виникненні деструктивної дії. Це дозволяє оцінити можливість drone виконати поставлені перед ним базові завдання і, при необхідності, визначити потребу в резервних шляхах (перебудовувана структура) взаємодії між елементами, що входять до складу підсистем drone.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Koshovyi M. D., Pylypenko O. T., Ilyina I. V., Tokarev V. V. Growing tree method for optimisation of multifactorial experiments, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2023, № 3, pp. 55–61. Doi: 10.15588/1607-3274-2023-3-6.
2. Кривуля Г.Ф., Токарев В.В., Іліна І.В., Кравець В.С. Взаємодія між «s-bots» однієї «Swarm-bot» system у фізичному неорганізованому середовищі, *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2023, №1(71), с.108-111. Doi: 10.26906/SUNZ.
3. Krivoulya G., Koshevoy N., Tokariev V., Ilyina I., Dubinsky D. Solving the Task of Topological Formation Intelligent Mobile «S-bots» for One «Swarm-bot» System, *Proceedings of the 7th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems: (COLINS 2023)*. CEUR Workshop Proceedings, 2023. Kharkiv. Ukraine, pp. 273-282.
4. Krivoulya G., Tokariev V., Ilyina I., Lebediev O., Shcherbak V. Algorithm of Iterations of Distribution of Subtasks Between «S-Bot» in One «Swarm-Bot» System, *Proceedings of the 6th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems: (COLINS 2022)*. CEUR Workshop Proceedings, 2022. Gliwice. Poland, pp. 1531-1541.
5. Krivoulya G., Ilyina I., Tokariev V., Shcherbak V. Mathematical Model for Finding Probability of Detecting Victims of Man-Made Disasters Using Distributed Computer System with Reconfigurable Structure and Programmable Logic, *PIC S&T*, 2020. Kharkiv. Ukraine, pp.573 - 576.
6. Churyumov G., Tkachov V., Tokariev V., Diachenko V. Method for Ensuring Survivability of Flying Ad-Hoc Network Based on Structural and Functional Reconfiguration, *ITS 2018, CEUR Workshop Proc.*, 2018. Kyiv, Ukraine, pp. 64-76.
7. Churyumov G., Tokarev V., Tkachov V., Partyka S. Scenario of Interaction of the Mobile Technical Objects in the Process of Transmission of Data Streams in Conditions of Impacting the Powerful Electromagnetic Field, *DSMP*, 2018. Lviv, pp.183-186.
8. Ткачов В.М., Токарев В.В., Радченко В.О., Лебедєв В.О. Проблема передачі даних типу BIG DATA у мобільній системі «Мультикоптер-сенсорна мережа», *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2017, №2(42), с.154-157.
9. T. Gao, X. Bai. Bayesian. Optimization-based Three-dimensional, Time-varying Environment Monitoring using an UAV, *IEEE Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2022, vol.105, no.4, pp.219 - 235. Doi:10.1007/s10846-022-01709-x.
10. L. Zhao, Y. Song, C. Zhang. T-GCN: A Temporal Graph Convolutional Network for Traffic Prediction, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, vol.21, no.9, pp.3848 - 3858. Doi:10.1109/TITS.2019.2935152.
11. E. Seraj, A. Silva, M. Gombolay. Multi-UAV planning for cooperative wildfire coverage and tracking with quality-of-service guarantees, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, article number.39, 2022, Springer. Doi:10.1007/s10458-022-09566-6.

Received (Надійшла) 05.11.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.01.2024

Analysis of existing approaches to calculating quantitative assessment of drones survivability

O. Lebediev, O. Bondar, E. Samoilenko, V. Cherevko

Abstract. Today, survivability reflects the resistance of both individual drone subsystems and the drone as a whole to destructive influences. Such survivability is built into the algorithmic part of the drone subsystems and allows, in the event of emergency situations, to change the sequence of operation of the drone subsystems. When solving the problem of analyzing and synthesizing elements of drone subsystems, they operate with a quantitative assessment of survivability. This is necessary to determine with what probability failures of individual elements of any drone subsystem will lead to damage to the entire drone. Currently, there is no consensus among drone developers to quantify the survivability of drones. A lot depends on the architecture of the drone subsystems. Their interactions with each other and the interactions of their elements with each other. This article is devoted to the study of approaches to calculating a quantitative assessment of the survivability of drones at the design stage.

Keywords: "Swarm-bot" - system, "s-bots", survivability, safety, reliability, invulnerability, resilience, reengineering, communication, nano-drone.