КІБЕРНЕТИКА та КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Open Access under CC BY-NC 4.0 License

УДК 004.75:004.056.5 DOI:10.34229/2707-451X.26.1.4

О.І. ЛАСТІВКА, О.П. НЕЧИПОРУК

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ПОТОКАМИ ДАНИХ У КАНАЛАХ ЗВ'ЯЗКУ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

У статті представлено концепцію побудови математичної моделі адаптивного управління потоками даних у каналах зв'язку безпілотних літальних апаратів. Запропонований підхід ґрунтується на принципах самоорганізації, пріоритетності інформації та розподілу ресурсів у реальному часі. У роботі визначено основні параметри адаптивності каналів зв'язку, зокрема швидкість передачі даних, затримку, втрата пакетів, стабільність сигналу та рівень навантаження. Розглянуто структуру інформаційних потоків між бортовими, наземними та мережевими компонентами системи управління, що дає змогу формалізувати взаємозв'язки між підсистемами.

Ключові слова: *безпілотний літальний апарат, адаптивне управління, математична модель, потоки даних, пропускна здатність, самоорганізація, телекомунікаційна система, стійкість зв'язку, оптимізація.*

© О.І. Ластівка, О.П. Нечипорук, 2026

Вступ. Системи управління безпілотними літальними апаратами характеризуються високою динамічністю, обмеженими енергетичними ресурсами та потребою у безперервному обміні даними між різнорівневими компонентами – бортовими системами, каналами зв'язку та наземними станціями. В сучасних умовах стрімко зростає обсяг інформації, яку необхідно обробляти та передавати у реальному часі: відеопотоки високої роздільності, телеметричні параметри, навігаційні дані та сигнали управління.

Основна проблема – це нестабільність каналів зв'язку, що проявляється у втраті пакетів, перевантаженні потоків, зростанню затримок та зниженні пропускної здатності при зміні умов середовища. Традиційні методи маршрутизації та управління трафіком, як правило не враховують адаптивні властивості каналів зв'язку. Крім того, наявність різнотипних каналів зв'язку (радіо, супутникових, мобільних) ускладнює узгодження параметрів передавання, синхронізацію потоків і розподіл навантаження. Це зумовлює необхідність розроблення інформаційної технології адаптивного управління потоками даних, здатної забезпечити стійкість зв'язку, мінімізацію втрат і оптимальне використання ресурсів у змінних умовах функціонування.

На основі аналізу сучасних методів управління трафіком розроблено математичну модель, яка описує динамічну взаємодію між потоками даних і каналами зв'язку. Модель враховує обмеженість ресурсів, пріоритетність різних типів інформації та варіативність станів каналів зв'язку. Формалізацію процесів адаптації здійснено шляхом введення змінних коефіцієнтів розподілу трафіку, яке оновлюються залежно від поточних параметрів якості зв'язку.

Побудована структурна схема інформаційної технології відображає основні етапи моніторингу, аналізу параметрів, прийняття рішень та корекції коефіцієнтів розподілу трафіку. Результати моделювання показали, що застосування адаптивного підходу забезпечує зменшення середньої затримки передачі та підвищення стійкості системи зв'язку при перевантаженні.

Виклад основного матеріалу. Проблематика ефективної передачі даних у каналах управління безпілотних літальних апаратів (БпЛА) широко представлена у працях українських, так і зарубіжних дослідників [1–12].

Передавання інформації у каналах зв'язку БпЛА [1] характеризується високою динамічністю топології, зміною пропускної здатності та значним впливом завад. Для забезпечення надійності зв'язку застосовують принципи адаптивного управління, які передбачають автоматичну зміну параметрів передавання залежно від поточного стану середовища.

У традиційних мережах такі механізми реалізується за допомогою методів маршрутизації та керування чергами, однак для БпЛА ці підходи потребують модифікації через високу мобільність вузлів, змінних рівнів сигналу та енергетичні обмеження. Більшість існуючих підходів орієнтована на окремі компоненти системи зв'язку – маршрутизацію, шифрування або балансування навантаження [2]. Водночас недостатньо дослідженим залишається питання комплексного адаптивного управління потоками даних, яке враховує змінні умови середовища, пріоритетність інформації та обмеженість ресурсів каналу.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення математичної моделі адаптивного управління потоками даних у каналах БпЛА, що інтегрує методи моніторингу, аналізу стану каналу та самоналаштування параметрів передавання.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- визначити структуру інформаційних потоків між компонентами системи управління БпЛА;
- дослідити фактори, що впливають на ефективність обміну даними (затримки, завади, пропускна здатність, черги);
- розробити концептуальну модель адаптивного управління потоками;
- обґрунтувати принципи самоорганізації та пріоритетного маршрутизаційного управління;
- оцінити очікувані показники якості передавання даних.

Запропонована модель може бути інтегрована у системи реального часу з метою оптимізації розподілу пропускної здатності, підвищення якості обслуговування та збереження цілісності переданої інформації навіть за умов змінного навантаження або впливу завад.

Для формалізації процесу управління потоками даних у каналах БпЛА розроблено структурну схему інформаційної технології (рис. 1), яка відображає послідовність етапів функціонування системи та взаємозв'язки між її основними компонентами.

На початковому етапі здійснюється моніторинг стану каналів зв'язку, який включає вимірювання параметрів якості обслуговування (затримка, пропускної здатності, втрати пакетів, рівня сигналу). Отримані дані передаються до модуля аналізу параметрів, де виконується їх оцінювання, порівняння з нормативними значеннями та виявлення відхилень.

На основі результатів аналізу модуль прийняття рішень формує керуючі сигнали для блоку корекції коефіцієнтів розподілу потоків, які змінюють параметри передавання у режимі реального часу. Далі здійснюється оновлення інформаційної бази та реалізується зворотний зв'язок, що забезпечує самонавчання системи й підвищує її адаптивність за умов зміни навколишнього середовища чи навантаження на мережу [3].

Запропонована структура дає змогу забезпечити стійкість та цілісність передавання даних навіть за наявності завад, перевантаження або втрати окремих каналів зв'язку.

Адаптивне управління потоками даних можна розглядати як систему із замкненим контуром, у якій параметри каналів зв'язку постійно контролюються, а результати вимірювань використовуються для корекції поточних режимів передавання. На відміну від статичних алгоритмів, адаптивні системи формують динамічну політику розподілу потоків на основі поточних значень пропускної здатності, завантаження каналів і пріоритетності трафіку [11–13].

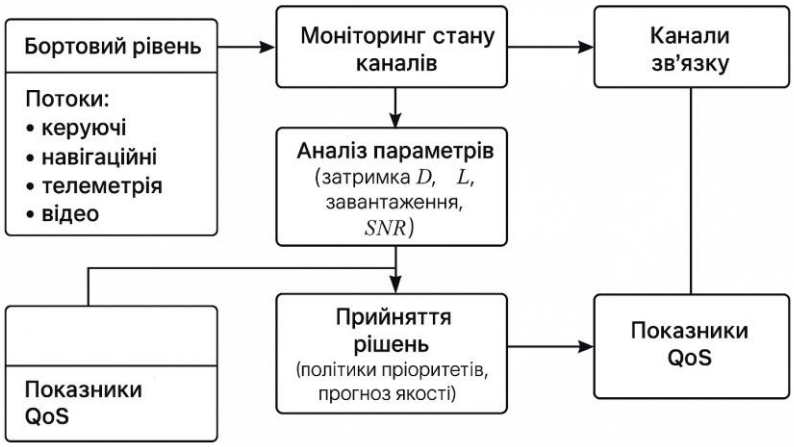

РИС. 1. Структурна схема адаптивного управління потоками даних в каналах БпЛА

Такий підхід забезпечує стабільність зв’язку за змінних умов середовища та мінімізує ризик втрати даних.

У науковій літературі для розв’язання подібних задач застосовуються методи оптимального керування, моделі масового обслуговування, елементи нечіткої логіки та адаптивні алгоритми типу PID або методи стабілізації. У цій роботі обрано спрощену модель із динамічними коефіцієнтами розподілу, яка забезпечує прийнятний компроміс між точністю опису та можливістю практичної реалізації у реальному часі [4–6]. Для формалізації процесів передавання даних у системах управління БпЛА розглянемо багатоканальну телекомунікаційну систему, у якій здійснюється передавання N інформаційних потоків через M каналів зв’язку.

Основні показники якості передачі інформації – це затримка D, імовірність втрат пакетів L, пропускна здатність C та коефіцієнт навантаження мережі. Оптимальне управління трафіком передбачає досягання балансу між цими параметрами, зокрема мінімізацію зменшення затримки без перевищення доступних ресурсів каналу. Для БпЛА важливим є забезпечення цілісності телеметричних даних і своєчасна доставка керуючих команд у межах допустимих затримок.

Крок 1. Основні параметри моделі:

R_i – швидкість передачі i-го потоку;

D_i – затримка доставки даних;

L_i – частка втрат пакетів;

P_i – пріоритет потоку;

C_j – пропускна здатність j-го каналу;

Q_j – поточне завантаження каналу.

Кожен інформаційний потік може передаватися через один або кілька каналів зв’язку із певним розподілом a_{ij}, де $a_{ij} \in [0,1]$ показує частку трафіку потоку i, що проходить через канал j.

Крок 2. Загальна пропускна здатність кожного каналу не повинна перевищувати його технічної межі:

$$\sum_{i=1}^{N} a_{ij} R_i \le C_j, \; j = 1....., M.$$

Це обмеження гарантує відсутність перевантаження каналів і втрат даних у чергах.

Крок 3. Середня затримка *i*-го потоку визначається як зважена сума затримок на каналах:

$$D_i = \sum_{j=1}^{M} a_{ij} \frac{1}{\mu_j \lambda_j},$$

де μ_j – швидкість обслуговування, $\lambda_j = \sum_i a_{ij} R_i$ – інтенсивність надходження трафіку. Такий підхід дозволяє оцінити, вплив зростання навантаження або зменшення пропускної здатності каналу на загальну затримку передавання даних.

Крок 4. Введемо узагальнений критерій ефективності, що враховує три головні показники: затримку, втрати та пріоритет потоку:

$$J = \sum_{i=1}^{N} P_i (\alpha D_i + \beta L_i - \gamma R_s),$$

де α, β, γ – вагові коефіцієнти, які відображають відносну важливість відповідних параметрів. Мета системи це мінімізація цього критерію: $min\ J$, що відповідає одночасному зниженню затримок і втрат за збереження максимальної швидкості передавання.

Крок 5. Система моніторингу в реальному часі вимірює параметри каналів $C_j(t), Q_j(t)$, рівень завад та динамічно змінює коефіцієнти розподілу $a_{ij}(t)$ за правилом: $a_{ij}(t+1) = a_{ij}(t) + k \cdot \frac{\partial J}{\partial a_{ij}}$, де k – коефіцієнт адаптації.

Це правило відображає самоорганізацію системи: у разі погіршення якості каналу автоматично зменшується обсяг трафіку через нього, потоки перенаправляються на більш стабільні лінії зв'язку.

Крок 6. Для забезпечення стійкого функціонування системи має виконуватися умова: $\lambda j \le \mu j,\ \forall j,$ що гарантує відсутність накопичення черг і втрат пакетів.

Передавання інформації у системах управління БпЛА – багатопараметричний процес, що залежить від пропускної здатності каналів, завадостійкості сигналу та обмежених ресурсів енергоспоживання.

Отримана модель описує адаптивну взаємодію між потоками даних і каналами зв'язку, та враховує: пріоритетність інформації; обмеженість ресурсів каналу (пропускну здатність, затримку, завади); механізм динамічного перерозподілу трафіку відповідно до поточного стану системи.

Таким чином, запропонований підхід дозволяє підвищити цілісність і стійкість передавання даних у системах управління БпЛА без необхідності жорсткого резервування каналів зв'язку.

На основі наведеної математичної моделі було проведено моделювання процесу передавання даних у каналах зв'язку БпЛА з урахуванням параметрів пропускної здатності, затримки та завантаження мережі. Для оцінки ефективності роботи алгоритму побудовано залежність середньої затримки передавання D_i від ступеня завантаження каналу.

На рис. 2 показано порівняльний графік, що демонструє поведінку системи у двох режимах: без адаптивного управління потоками (традиційна статична маршрутизація) та з використанням адаптивного розподілу ресурсів, реалізованого за поданою математичною моделлю.

Як видно з графіка, у міру збільшення навантаження адаптивна система підтримує стабільно нижчий рівень затримки та втрат пакетів, що свідчить про підвищення ефективності використання каналів зв'язку. Це підтверджує адекватність розробленої моделі та доцільність її застосування для підвищення якості обслуговування (QoS) у мережах передачі даних БпЛА.

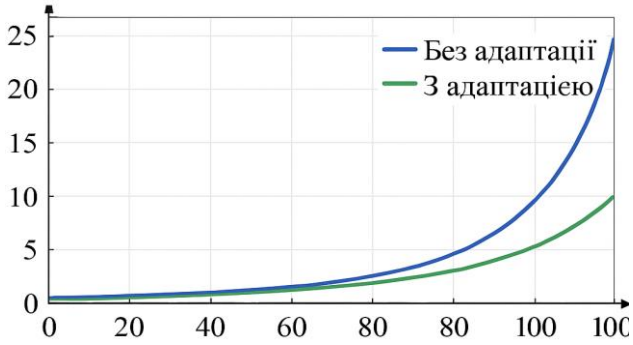

РИС. 2. Графік залежності параметрів якості передачі

Для аналізу таких систем доцільно використовувати модель багатоканальної мережі черг, у якій вузли відображають передавальні ланки, а потоки – інформаційні запити різних типів (керуючі, телеметричні, відео) [7–9].

Побудова порівняльного графіка (рис. 2) здійснена за допомогою Python-скрипта, який обчислює середню затримку та формує графічне відображення результатів:

```
import matplotlib.pyplot as plt
mu = 1.0  #
load = np.linspace(0.1, 0.9, 30)
lam_no = load * mu
D_no = 1.0 / (mu - lam_no)
lam_adapt = 0.85 * lam_no
D_adapt = 1.0 / (mu - lam_adapt)
# Побудова графіка
plt.figure(figsize=(6, 4), dpi=150)
plt.plot(load * 100, D_no, label="Без адаптації")
plt.plot(load * 100, D_adapt, label="З адаптацією")
plt.xlabel("Завантаження каналу, %")
plt.ylabel("Середня затримка")
plt.title("Залежність середньої затримки від завантаження каналу")
plt.legend(loc="best")
plt.grid(True, linestyle="--", linewidth=0.6, alpha=0.6)
plt.tight_layout()
```

Кожен потік має власні вимоги до якості сервісу, допустимі затримки, рівень втрат пакетів та мінімальну пропускну здатність. Система управління має забезпечити адаптивний розподіл ресурсів між потоками так, щоб зберегти цілісність даних навіть за умов перевантаження або деградації одного з каналів. Для цього вводяться коефіцієнти розподілу, що змінюються у відповідь на коливання якості зв’язку. Такий підхід реалізує принцип самоорганізації: система автоматично коригує маршрутизацію та обсяг трафіку без втручання оператора. Математична модель описує взаємозв’язок між основними параметрами – швидкістю передачі, затримкою, втратами, пріоритетністю та завантаженістю каналу.

На її основі може бути реалізований контур адаптивного керування, який складається з трьох взаємопов’язаних блоків: моніторингу стану мережі, аналізу відхилень і прийняття рішень про перерозподіл потоків.

Висновки. У статті запропоновано математичну модель адаптивного управління потоками даних у каналах безпілотних літальних апаратів. Модель враховує взаємозв'язок між пропускною здатністю, затримкою передачі, навантаженням та пріоритетністю інформаційних потоків.

Отримані результати свідчать, що використання адаптивного підходу дозволяє зменшити середню затримку передачі та підвищити стійкість зв'язку навіть за умов перевантаження або дестабілізуючих впливів на канал.

Побудована структурна схема та результати моделювання підтвердили ефективність механізму динамічного перерозподілу ресурсів між потоками різних типів.

Запропонований підхід може бути основою для подальшої розробки інтелектуальних систем керування трафіком у мережах БпЛА та інтеграції їх у гібридні комунікаційні середовища.

Перспективи подальших досліджень включають удосконалення моделі шляхом урахування впливу просторових і частотних завад, а також впровадження алгоритмів машинного навчання для прогнозування параметрів якості передачі даних у реальному часі.

Список літератури

1. Kashkevich S. Decision support systems: mathematical support. Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, 2025. 202. https://doi.org/10.15587/978-617-8360-13-9
2. Нечипорук О.П, Кашкевич С.О, Дегтяр Ю.В. Дослідження та аналіз пропускної здатності каналів передачі в телекомунікаціях. *XX Міжнародна науково-практична конференція «Technologies, innovative and modern theories of scientists», 23–26 травня 2023 р*., Грац, Австрія. Р. 495–499.
3. Нечипорук В.В., Кашкевич С.О., Голего Н.М. Метод децентралізованого управління мережевими ресурсами інформаційно- комунікаційних мереж. *XIX Міжнародна науково-практична конференція «Innovative approaches to solving scientific problems», 16–19 травня 2023 р*., Токіо, Японія. С. 454–458.
4. Плєхова Г.А., Неронов С.М., Костікова М.В., Кашкевич С.О. Удосконалення моделі безпечної маршрутизації в програмно-конфігурованих мережах. ХНУРЕ. *Біоніка інтелекту*. 2024. Том 1, № 100. С. 50–57. https://doi.org/10.30837/bi.2024.1(100).07
5. Tamer K.A., Sova O., Shaposhnikova O., Yashchenok V., Stanovska I., Shostak S., Rudenko O., Petruk S., Matsyi O., Kashkevich S. Development of a solution search method using a combined bio-inspired algorithm. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 1, No. 4 (127). p. 6–13. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298205
6. Kashkevich S., Litvinenko O., Shyshatskyi A., Salnyk S., Velychko V. The method of self-organization of information networksin the conditions of the complex influence of destabilizing factors. *Сучасні інформаційні системи*. 2024. Т. 8, № 3. С. 59–79. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.3.07
7. Сова О.Я. Інтелектуальна модель забезпечення радіозв'язності вузлів мобільних радіомереж класу MANET. *Системи озброєння і військова техніка*. 2015. №2. С. 134–151.
8. Al-Ammouri A., Lebid I., Dekhtiar M., Lebid I., Al-Ammori H. Development of a mathematical model of reliable structures of information-control systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 5/9, Iss. 119. P. 68–78. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265953
9. Pozna C., Precup R.-E., Horváth E., Petriu E.M. Hybrid Particle Filter–Particle Swarm Optimization Algorithm and Application to Fuzzy Controlled Servo Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. Oct. 2022. Vol. 30, No. 10. P. 4286−4297. https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2022.3146986
10. Mirjalili S., Mirjalili S.M., Lewis A. Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*. 2014. Vol. 69. P. 46–61. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007
11. Braik M.S. Chameleon swarm algorithm: a bio-inspired optimizer for solving engineering design problems. *Expert Systems with Applications*. 2021. Vol. 174. 114685. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114685
12. Duan H., Qiao P. Pigeon-inspired optimization: a new swarm intelligence optimizer for air robot path planning. *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*. 2014. Vol. 7, Iss. 1. P. 24–37. https://doi.org/10.1108/IJICC-02-2014-0005
13. Скибицький Н.М. Дворівневий алгоритм для задачі маршрутизації БПЛА з рухомими цілями. *Cybernetics and Computer Technologies*. 2025. 4. С. 29–36. https://doi.org/10.34229/2707-451X.25.4.3

Received/Одержано 20.11.2025 Accepted/Прийнято 03.03.2026 Published/Надруковано 27.03.2026

Ластівка Олександр Іванович,
аспірант кафедри інтелектуальних кібернетичних систем
Державного університету «Київський авіаційний інститут»,
https://orcid.org/0009-0005-4754-259X
2450626@stud.kai.edu.ua

Нечипорук Олена Петрівна,
доктор технічних наук, професор, професор кафедри інтелектуальних кібернетичних систем
Державного університету «Київський авіаційний інститут».
https://orcid.org/0000-0001-8203-7998

UDC 004.75:004.056.5

Oleksandr Lastivka [*], Olena Nechyporuk

A Mathematical Model for Adaptive Data Flow Control in Communication Channels for Unmanned Aerial Vehicles

State University "Kyiv Aviation Institute", Ukraine
[*] Correspondence: 2450626@stud.kai.edu.ua

The article presents the concept of building a mathematical model of adaptive control of data flows in communication channels of unmanned aerial vehicles. The proposed approach is based on the principles of self-organisation, information prioritisation, and real-time resource allocation. The paper identifies the main parameters of communication channel adaptability: transmission speed, delay, packet loss, signal stability, and load level. The structure of information flows between the onboard, ground, and network components of the control system is considered, which allows formalising the relationships between subsystems.

The purpose of the article is to develop a mathematical model of adaptive data flow management in UAV communication channels to ensure stable, synchronised and integrated information transmission.

Results. Based on the analysis of modern traffic management methods, a mathematical model has been developed that describes the dynamic interaction between data flows and communication channels. The model takes into account resource limitations, the priority of information types, and channel state variability. The adaptation processes have been formalised by introducing variable traffic distribution coefficients that are updated depending on the current communication quality parameters.

The constructed structural diagram of information technology reflects the stages of monitoring, parameter analysis, decision-making, and correction of distribution coefficients. The modelling results showed that the use of an adaptive approach reduces the average transmission delay and increases the stability of communication during overload.

Conclusions. The results obtained indicate that formalisation of the mechanism of self-organised redistribution of flows in multi-channel UAV communication systems ensures increased channel stability and efficient use of network resources. The proposed model can be integrated into real-time systems to optimise bandwidth distribution, improve service quality and preserve the integrity of transmitted information even under variable load conditions or interference.

Keywords: unmanned aerial vehicle, adaptive control, mathematical model, data flows, bandwidth, self-organisation, telecommunications system, communication stability, optimisation.