

УДК 629.735.051

Лисенко О. І. , д.т. н, проф.
Інститут телекомунікаційних систем НТУУ «КПІ»;
Семенченко А. І. , д. держ. упр, проф.
Національна академія державного
управління при президентові України;
Кірчу П. І. , к. т. н.;
Валуйський С. В. , к. т. н
НДЦ проблем авіації та
авіаційного пошуку і рятування ІДУ ЦЗ,

РОЗВИТОК МЕТОДУ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ МОБІЛЬНИХ РАДІОМЕРЕЖ НА ОСНОВІ БПЛА

В роботі розглядається метод підвищення продуктивності мобільних радіомереж на основі управління положенням телекомунікаційних аероплатформ в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення мобільних абонентів. Пропонується подальший розвиток цього методу, а саме удосконалення підсистеми керування польотом мережі безпілотних літальних апаратів, що дозволить оперативно відпрацьовувати отримані на попередньому етапі координати місцеположення при мінімізації енерговитрат на керування.

Предложен метод оперативного синтеза оптимального по энергозатратам закона управления малоразмерным БПЛА самолетного типа, который используется в качестве высотной ретрансляционной аероплатформы, в условиях наличия неопределенных параметрических и стохастических возмущений большой интенсивности.

This paper considers a method of improving the performance of mobile radio-based telecommunications management position aeroplatform the rapid and unpredictable movement of mobile subscribers. Proposed further development of this method, namely the improvement of network subsystem flight control of unmanned aerial vehicles that will quickly got off at an earlier stage coordinates location while minimizing energy consumption of control.

Вступ. Головними критеріями ефективності системи цивільного захисту при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного чи техногенного характеру є оперативність та економічність, тобто мінімізація витрат часу та ресурсів на пошуково-рятувальні роботи,

виявлення та локалізацію потенційно небезпечних об'єктів тощо. Це можливо шляхом розгортання мобільних епізодичних мереж (МЕМ) із використанням телекомунікаційних аероплатформ (ТА) (рис.1) [1]. Абоненти таких мереж (рятувальники, сенсори чи транспортні засоби) можуть з'єднуватись між собою (або з координаційним центром) на основі тимчасових зв'язків із ретрансляцією через проміжні вузли наземного чи повітряного базування. В якості повітряних ретрансляторів можуть використовуватися не тільки засоби цивільної авіації МНС (літаки Ан-32П, гелікоптери Мі-8 та ЕС-145), а й безпілотні авіаційні комплекси міні- та мікро- класу.

Однак функціонування таких МЕМ не можливе без ефективної системи управління (СУ), яка б дозволяла швидко реагувати на структурні та функціональні зміни, забезпечуючи ті чи інші цілі управління, зокрема підвищення продуктивності мережі, зв'язності абонентів, надійності, живучості та ін.

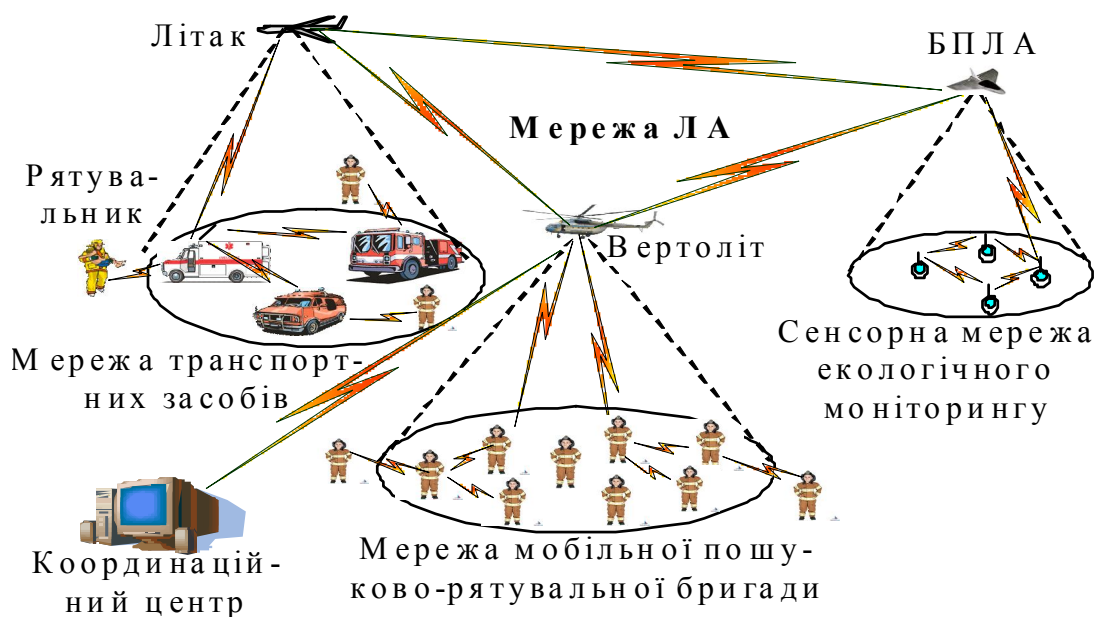


Рис.1. Приклад організації мобільної епізодичної мережі із використанням повітряних ретрансляторів

Аналіз досліджень і публікацій. Над проблемою підвищення продуктивності мобільних радіомереж, побудованих із використанням БПЛА працювало багато відомих вітчизняних та іноземних науковців [2-4]. Зокрема проф. Романюком В.А. була запропонована функціональна модель системи оперативного управління мережею БПЛА [5], головними складовими якої є підсистема управління топологією та підсистема керування польотом. Підсистема управління топологією визначає оптимальне положення множини ТА відповідно до обраного критерію та скеровує підсистему управління польотом для виконання заданої цілі, наприклад, підвищення продуктивності мережі.

В роботах [6-8] було запропоновано метод управління топологією МЕМ, що представляє собою обчислювальну процедуру, яка дозволяє оперативно визначати близьке до оптимального місцеположення множини БПЛА за критерієм максимуму продуктивності мережі. Однак на практиці є необхідним не тільки оперативне обчислення місцеположення аероплатформ, а й оперативне відпрацювання цього рішення системою керування польотом при обмеженні паливних витрат в умовах дії інтенсивних стохастичних зовнішніх збурень. В цьому аспекті зазначений метод дістане подальшого розвитку в даній роботі.

Постановка завдання. Спочатку сформулюємо загальну постановку задачі. Нехай задано наступні вихідні дані: поточні координати положення та швидкість переміщення мобільних абонентів (МА) $X_i = [x_i, y_i, z_i, \vec{v}_i, i = \overline{1, N}]$, де N – кількість МА в мережі (будемо вважати, що всі МА переміщуються в одній площині на рівні моря, тобто $z_i = 0$); поточні координати положення та швидкість переміщення БПЛА $X_{0k} = [x_{0k}, y_{0k}, z_{0k}, \vec{V}_{0k}, k = \overline{1, K}]$, де K – кількість БПЛА в мережі (будемо вважати, що всі БПЛА баражують на однаковій висоті над рівнем моря, тобто $z_{0k} = h$); максимальні радіуси

передачі (приймання) МА d^0 та БПЛА D^0 (в площині БПЛА), R^0 (в площині МА) (однакові для всіх вузлів); параметри радіоканалів: V – швидкість передачі, L – довжина пакету даних (однакові для всіх каналів); вимоги до трафіку – мінімальна продуктивність s^0 та максимальна затримка передачі t_s^0 ; протоколи множинного доступу – із контролем несучої ти виключенням колізій (для каналів МА-МА, МА-БПЛА), із частотним розділенням (для каналів БПЛА-БПЛА); метод маршрутизації – гібридний (наприклад, ZRP), алгоритм пошуку найкоротших шляхів – Дейкстри; усі абоненти без пріоритету в обслуговуванні, тобто матриця розподілу трафіку Γ – однорідна; тип трафіку – однорідний пуасонівський (без пріоритету в обслуговуванні); тип обслуговування пакетів в вузлах мережі – з очікуванням без обмеження довжини черги.

Тоді загальну постановку задачі можна сформулювати наступним чином: визначити розміщення X групи телекомунікаційних аероплатформ (БПЛА) для максимізації продуктивності мережі S , тобто

$$S = f(X) \rightarrow \max_{X \in \Omega}, \quad (1)$$

де Ω – ОДЗ, що визначається вимогами до зв'язності та показників функціонування МЕМ; $X = [X_{01}, \dots, X_{0k}]$, де $X_{01} = [x_{01}, y_{01}, z_{01}]$, ..., $X_{0k} = [x_{0k}, y_{0k}, z_{0k}]$, $k = \overline{1, K}$. Детальна математична постановка задачі наведена в [8].

Метод підвищення продуктивності мобільних епізодичних мереж.
Для вирішення цієї задачі запропоновано метод на основі управління положенням телекомунікаційних аероплатформ.

В основу методу покладена ідея підвищення продуктивності мобільних радіомереж на основі управління положенням телекомунікаційних аероплатформ.

Суть ідеї полягає в тому, що оптимальне розміщення телекомунікаційних аероплатформ у просторі дозволяє створити таку структуру мережі, що має більшу кількість незалежних маршрутів передачі даних між абонентами, а згідно теореми Форда-Фалкерсона це дозволяє збільшити мінімальний перетин та максимальний потік, що мережа може пропустити в одиницю часу, тобто підвищити її продуктивність.

Суть методології, що втілює запропоновану ідею, полягає в тому, що пропонується об'єднати в єдину обчислювальну процедуру удосконалені математичні моделі оцінки структурно-функціональної зв'язності МА та удосконалений алгоритм пошуку квазіоптимального положення телекомунікаційних аероплатформ (детально розглядаються в [8]), що дозволить досягати близьких до екстремальних значень продуктивності мобільних радіомереж в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення мобільних абонентів.

Схема-алгоритм розробленого методу представлена на рис. 2. Вона включає в себе наступні етапи: збір інформації про стан та параметри функціонування мережі (блок 1); розрахунок та оцінка параметрів її структури та функціонування (блоки 4,7); знаходження нового місцеположення БПЛА у випадку відхилення параметрів функціонування від допустимих значень, що реалізує задану ціль управління (максимум продуктивності) (блоки 6,9,10); виконання отриманого рішення (вивід або переміщення БПЛА у задану точку простору) (блок 11) та адаптація до реальних умов функціонування (блок 12). Даний цикл реалізуються послідовно і оперативно для кожного БПЛА в залежності від того, на скільки суттєво змінилася топологія мережі по відношенню до її попереднього стану (визначається характером та рівнем мобільності абонентів [19]).

Алгоритм знаходження нового положення БПЛА у загальному випадку зводиться до перебору усіх можливих варіантів розміщення БПЛА. Однак ця

задача відноситься до класу NP-повних, тому для скорочення повного перебору варіантів розміщення БПЛА запропоновано використовувати попередньо розроблену сукупність правил відбору варіантів такої зміни зв'язності мережі, що підвищують її пропускну здатність, а також зменшують час обчислень. Це дозволяє отримати в режимі реального часу близькі до оптимальних рішення і використовувати алгоритм для оперативного управління положенням телекомунікаційних аероплатформ.

Проведена оцінка ефективності запропонованого методу дозволяє зробити наступні висновки:

1) середній виграш запропонованого методу відносно існуючих становить 15-20%;

2) середнє відхилення продуктивності відносно методу повного перебору становить 5-7%;

3) середній час отримання рішення для запропонованого методу становить од./дес. секунд на відміну від десятків хвилин для існуючих методів, що дозволяє виконувати управління положенням ЛА (БПЛА) в режимі реального часу.

Проте визначення оптимального положення в режимі реального часу ще не гарантує негайного його відпрацювання, тому предметом подальшого розвитку методу є вирішення задачі синтезу оптимального закону керування польотом БПЛА для виконання отриманого рішення у найкоротший час і з найменшими енергозатратами на керування.

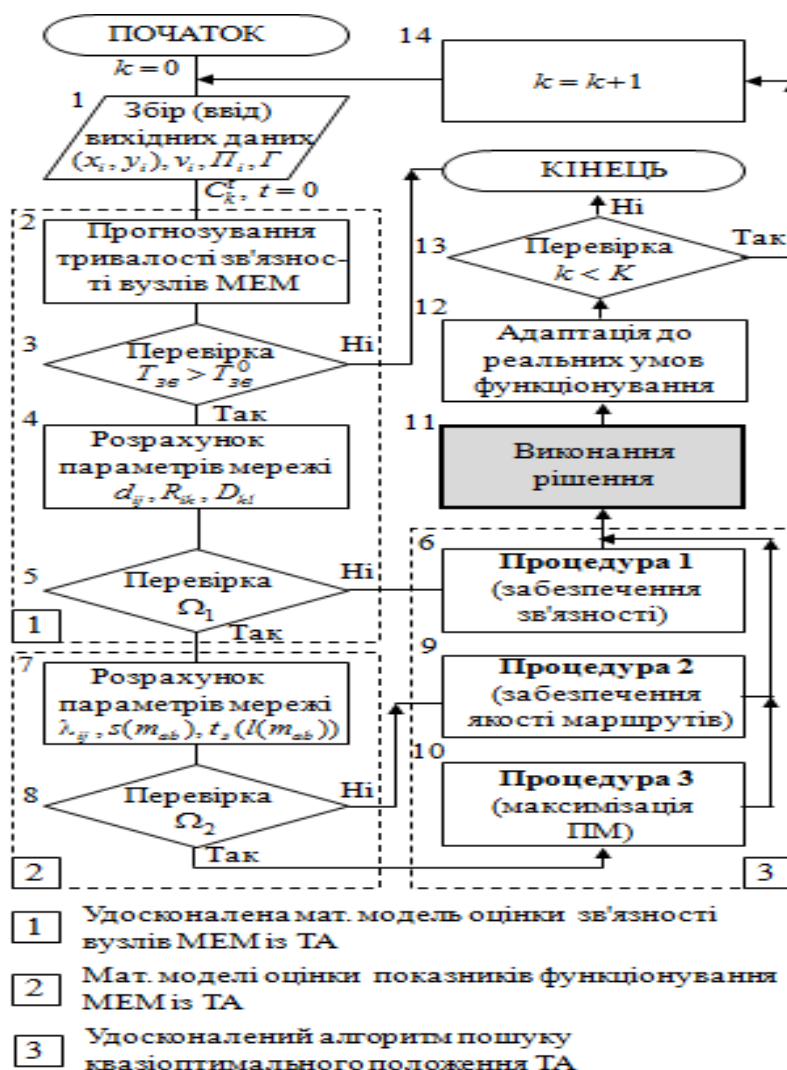


Рис. 2. Процедури методу підвищення продуктивності мобільних епізодичних мереж із телекомунікаційними платформами

Синтез комбінованої адаптивної системи керування[9-18].

Узагальнена процедура синтезу адаптивного алгоритму керування з еталонною моделлю складається з наступних етапів: Етап 1 Постановка задачі синтезу; Етап 2 Синтез оптимальної еталонної моделі; Етап 3 Синтез оптимального спостерігача стану (фільтра Калмана); Етап 4 Вибір структури регулятора (синтез основного контуру); Етап 5 Вибір настроюваних параметрів; Етап 6 Вибір алгоритму адаптації; Етап 7 Загрублення; Етап 8 Налаштування адаптера.

На етапі 2 докладно розглянуто процедуру синтезу оптимальної неперервної та дискретної еталонної моделі. В процесі синтезу оптимальної (з точки зору енерговитрат на управління) еталонної моделі застосовується лінійний оптимальний квадратичний регулятор (ЛОКР), який використовується для корегування динаміки об'єкту керування (БПЛА). Для синтезу оптимального квадратичного регулятора розглядається номінальна лінійна стаціонарна модель детермінованого об'єкту керування у вигляді простору станів. Тоді задача оптимального регулятора визначається як задача знаходження оптимального управління $u(t)$ на інтервалі $[t_0, t_f]$, такого, щоб була мінімальна наступна функція вартості:

$$J_0(x(t_0), t_0) = \int_{t_0}^{t_f} [x(t)^T \Psi x(t) + u(t)^T \Phi u(t)] dt + x(t_f)^T \Psi_f x(t_f), \quad (7)$$

де $\Psi \in R^{n \times n}$ і $\Phi_f \in R^{m \times m}$ - симетричні невід'ємно-визначені матриці, а $\Phi \in R^{n \times n}$ – симетрична невід'ємно-визначена матриця. Для досягнення бажаної якості перехідних процесів еталонної моделі детально розглядається процедура вибору матриць вагових коефіцієнтів Ψ та Φ .

Оскільки для застосування адаптивного закону керування необхідно знати повний вектор стану ОК тому на третьому етапі синтезується оптимальний спостерігач стану. Як відомо умовою застосування процедури синтезу оптимального спостерігача стану є дія на об'єкт білого шуму у якості стохастичних збурень. Однак основним стохастичним збуренням, що діє на БПЛА в польоті є турбулентний вітер, а він не являється білим шумом. Тому для застосування процедури синтезу оптимального спостерігача стану необхідно об'єкт керування описати в просторі станів у вигляді послідовного з'єднання формуючого фільтру, який описує дію турбулентного вітру на БПЛА, та моделі детермінованого об'єкту керування, яка включає в собі модель послідовного з'єднання виконавчих механізмів з об'єктом. Входи формуючого фільтру збурюються некорельованими білими шумами, а на виході маємо кольорові шуми, які характеризують турбулентність атмосфери. Тоді входи розширеного об'єкту у просторі станів будуть збурюватися білими

шумами, що є необхідною умовою застосування процедури синтезу оптимального спостерігача стану, а безпосередньо на об'єкт буде діяти кольоровий шум, що характеризує дію турбулентності. В американській практиці стандартизовано модель формуючого фільтру. Для опису турбулентності вітру використовується модель Драйдена MIL-F-8785C. У відповідності з нею турбулентний вітер може бути представлений як стохастичний процес, що залежить від швидкості і може бути розділений на три складові: повздовжню u_g , бокову v_g та вертикальну w_g . Для літака, що летить з швидкістю V через турбулентне поле з просторовою частотою Ω рад/м, кругова частота ω обчислюється шляхом множення V на Ω . На етапі 4 – 7 розглядаються процедури синтезу оптимальної адаптивної системи керування аероплатформою з використанням функцій Ляпунова та методу градієнтного спуску.

Процедуру ідентифікації проводиться періодично. Під час розрахунку матриць параметрів ОК система керування запам'ятовує значення матриць коефіцієнтів K^X та K^R та згідно з гіпотезою квазістаціонарності на час ідентифікації закон керування стає стаціонарним, відповідно до того який адаптивний регулятор використовується в даний момент. Аналогічна процедура проходить і в спостерігачі стану де на час розрахунку оновлених параметрів оптимального спостерігача зберігаються та використовуються попередні значення.

Результати роботи комбінованої нелінійної дискретної адаптивної системи автоматичного керування БПЛА, який знаходиться під впливом зовнішніх стохастичних збурень представлені на рис. 3, рис. 4. На рис.5, рис. 6 представлені графіки зміни миттєвого відносного зменшення паливних витрат та енерговитрат на керування керуючими поверхнями для режиму керування швидкістю при стабілізації висоти.

Наведені залежності відображають відносне зменшення енерговитрат на керування та паливних витрат при застосуванні еталонної моделі побудованій

на основі оптимального квадратичного регулятора по відношенню до закону керування побудованого на методі стандартних коефіцієнтів. Загальне середнє зниження паливних витрат становить 15,47 %, а загальне середнє зниження енерговитрат на керування керуючими поверхнями становить 13,24 %.

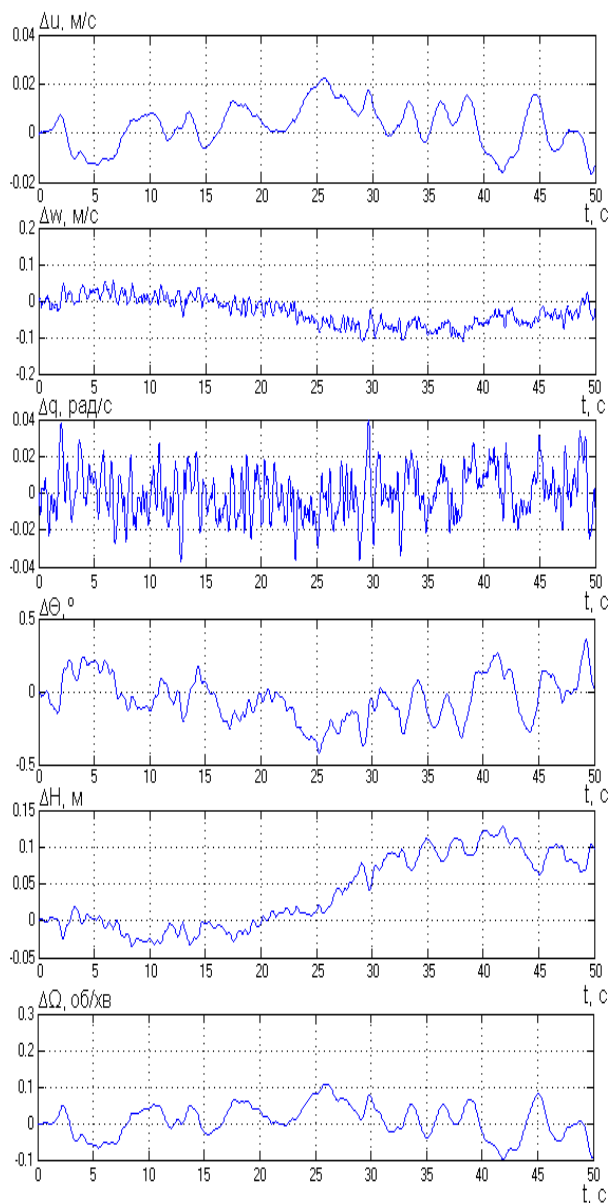


Рис. 3. Похибка комбінованої нелінійної дискретної адаптивної САК в поздовжньому каналі $E_i = \Delta X_i = X_i - X_{im}$

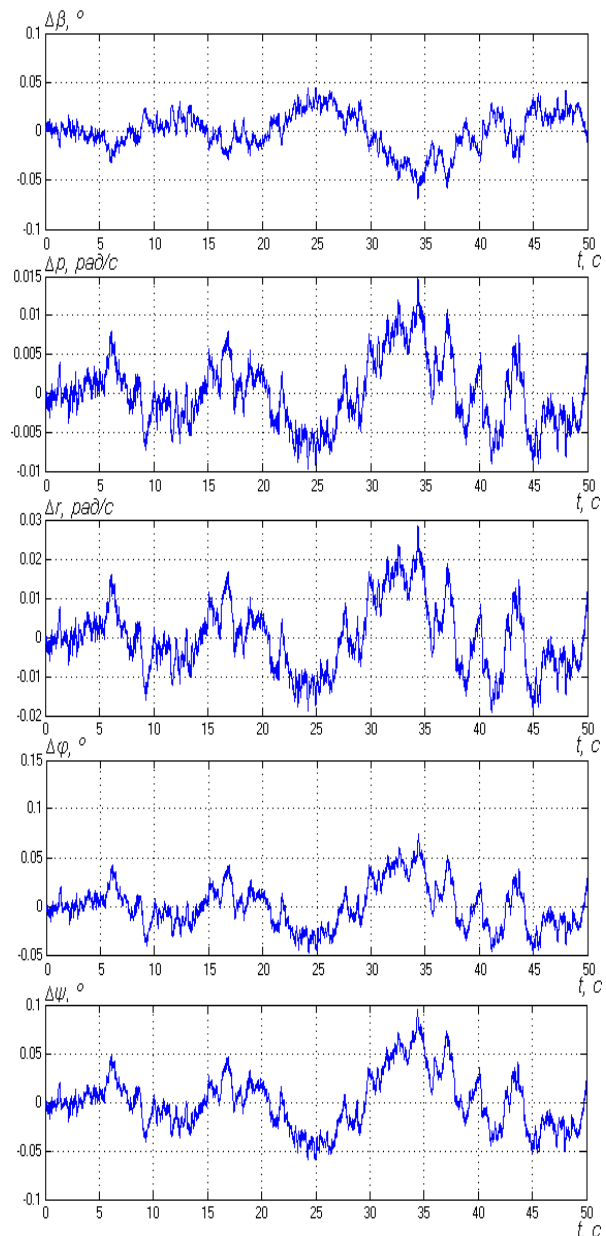


Рис. 4. Похибка комбінованої нелінійної дискретної адаптивної САК в боковому каналі $E_i = \Delta Y_i = Y_i - Y_{im}$

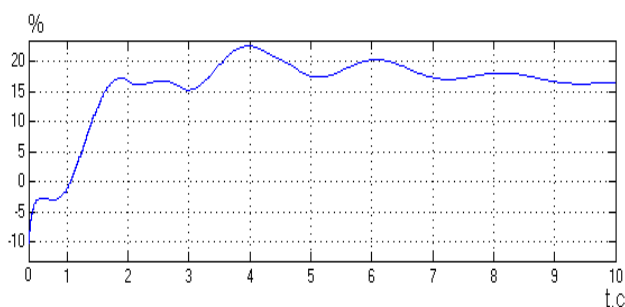


Рис. 5. Зміна миттєвого відносного зниження паливних витрат

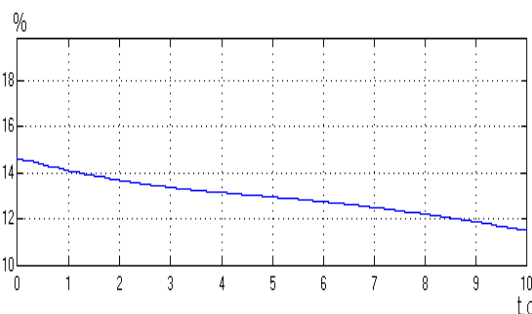


Рис. 6. Зміна миттєвого відносного зниження енерговитрат на керування керуючими поверхнями

Висновки. В роботі розглядається метод підвищення продуктивності мобільних радіомереж на основі управління положенням телекомунікаційних аероплатформ в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення мобільних абонентів. Пропонується подальший розвиток цього методу, а саме удосконалення підсистеми керування польотом мережі безпілотних літальних апаратів, що дозволить оперативно відпрацьовувати отримані на попередньому етапі координати місцеположення при мінімізації енерговитрат на керування. Запропоновані підходи дозволять підвищити продуктивність мережі на 15-20% при цьому знизити паливні витрати у середньому на 13-15%, а також підвищити оперативність планування та перепланування мережі на порядок, зменшити вартість створення телекомунікаційної мережі в зоні стихійного лиха, що проектується, у середньому до 10% в порівнянні з кращими раніш відомими методами.

Використані джерела інформації:

1. Бунин С.Г., Войтер А.П., Ильченко М. Е., Романюк В. А. Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами. – К.: Наукова думка, 2012. – 444 с.
2. Basu P. Coordinated Flocking of UAVs for Improved Connectivity of Mobile Ground Nodes / P. Basu, J. Redi, V. Shurbanov // IEEE MILCOM'04 : Military Communications Conference, October 31 – November 3 2004 : proceedings. – Monterey, 2004. – Vol. 3. – P. 1628–1634.
3. Chandrashekar J.S. Providing full connectivity in large ad-hoc networks by dynamic placement of aerial platforms / J.S. Chandrashekar, K. Dekhordi, M.R. Baras // In Proceedings of IEEE MILCOM'04. – 2004. – V.3. – P. 1429–1436.
4. Han Z. Smart deployment / movement of unmanned air vehicle to improve connectivity in MANET / Z. Han, A.L. Swindlehurst, K.J.R Liu // in Proc. IEEE Wireless Commun. network conference. – 2006. – V.1. – P. 252– 257.

5. Міночкін А. І. Задачі управління топологією мережі безпілотних літальних апаратів мобільного компоненту мереж зв'язку військового призначення / А. І. Міночкін, В. А. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ». – 2005. – № 2. – С. 83–90.
6. Lysenko O. The optimal control of UAV network topology / O. Lysenko, S. Valuiskyi, O. Panchenko // Aviation in the XXI-st century – Safety in Aviation and Space Technologies : fourth world congress, 21-23 September 2010 : proceedings. – Kyiv, 2010. – P. 1637–1640.
7. Lysenko O.I. A method of controlling the topology of aerial repeaters network to improve structural information connectivity of wireless ad hoc networks / O.I. Lysenko, I.V. Uryadnikova, S.V. Valuiskyi, I.O. Nechyporenko // Military & Science. – 2012. – vol. 7. – № 1. – P. 62 – 70.
8. Lysenko O.I., Valuiskyi S.V. Capacity increasing of sensor telecommunication networks / O.I. Lysenko, S.V. Valuiskyi // Telecommunication Sciences. – 2012. – vol. 3. – № 1. – P. 5–11.
9. Буков В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления / Буков В.Н. – М.: Наука, 1987. – 230 с.
10. Николаев Ю.А. Построение адаптивных цифровых систем управления многорежимных летательных аппаратов / Ю.А. Николаев, Е.Д. Теряев, И.С. Уколов, Б.М. Шамриков // Вопросы кибернетики. Проблемы авиационной и космической кибернетики (адаптивные системы управления летательных аппаратов с ЦВМ). – М.: Научный совет АН СССР по комплексной проблеме «Кибернетика», 1974. – с. 91 – 115.
11. Лысенко А.И. Применение классического способа синтеза САУ методами ЛАЧХ для создания робастного закона управления короткоживущим ДПЛА / А.И. Лысенко, П.И. Кірчу // Механіка гіроскопічних систем. – 2008. – № 19. – С. 47–52.
12. Лысенко А.И. Метод синтеза оптимального по энергозатратам закона управления мобильной телекоммуникационной аэроплатформой / А.И. Лысенко, П.И. Кірчу // Науковий вісник академії муніципального управління, серія «Техніка». – 2010. – № 1. – С. 61–67.
13. Лисенко О.І. Дослідження оптимального адаптивного закону керування аероплатформою для телекомунікаційних систем / О.І. Лисенко, П.І. Кірчу // Інформаційні системи, механіка та керування. – 2011. – № 6. – С. 96–102.
14. Метод управління топологією мережі повітряних ретрансляторів для підвищення структурно-інформаційної зв'язності безпроводових епізодичних мереж / О.І. Лисенко, С.В. Валуйський, П.І. Кірчу // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ». – 2011. – № 1. – С. 117–126.
15. Лисенко О.І. Особливості побудови телекомунікаційної мережі на основі аероплатформ / О.І. Лисенко, П.І. Кірчу, С.В. Валуйський // Наукоємні технології. – 2011. – № 1-2(9-10). – С. 58–64.
16. Лисенко О.І. Методика побудови системи автоматичного керування безпіотною ретрансляційною аероплатформи, яка використовується для підвищення зв'язності безпроводових епізодичних мереж / О.І. Лисенко, П.І. Кірчу // Науковий вісник академії муніципального управління, серія «Техніка». – 2011. – № 4. – С. 101–111.
17. Теряев Е.Д. Об адаптивных цифровых системах управления самолетами / Е.Д. Теряев // Вопросы кибернетики. Проблемы авиационной и космической кибернетики. – М.: Научный совет АН СССР по комплексной проблеме «Кибернетика», 1981. – с. 44–53.
18. Nikiforuk P.N. Design a two-level adaptive controller for application to flight control system / P.N. Nikiforuk, H. Ohta, M.M. Gupta // AIAA Guid. and Contr. Conf. Hollywood, 1977 Collect. Techn. Pap., 1977. – p. 97–108.
19. Valuiskyi S. V. Evaluation of the duration of mobile subscribers connectivity of wireless ad hoc networks / S. V. Valuiskyi // Scientific Papers of Military institute of telecommunication and informatization of NTUU «KPI». – 2011. – № 3. – P. 6–