

УДК 681.5(042.3)

Семко В. В., к. т. н.; Чепіженко В. І., д. т. н.

ПОБУДОВА ОБЛАСТЕЙ КЕРОВАНИХ СТАНІВ ДИНАМІЧНОГО ОБ'ЄКТА

Semko V. V., Chepizhenko V. I. Construction of the guided states areas of dynamic object. The mathematical model of dynamic object moving in spacious supervisions is offered and investigated. As a result of research of mathematical model there are certain parameters, which at certain suppositions determine correlations which describe space of the guided status in physical space of moving of management object. In the process of research there is determined method of synonymous mutual reflection of parameters, that characterize moving of dynamic object in physical space and parameters which determine its conduct in mathematical space.

On the basis of offered approach possible maximum rejections of the dynamic object management organs on the certain stages of its moving to the spacious supervisions are defined. Possibility of definition of the assured management space allows to decide the task of co-operation conflict of management object with the opened plural of supervision objects in the limited conditions.

As an example for a substantially nonlinear dynamic object (an aircraft) a calculation and formal reflection of informative plural of dynamic appearance of the guided and semiguided states of management object is carried out.

Keywords: mathematical model, space of the assured management, dynamic object, management object, informative plural

Семко В. В., Чепіженко В. І. Побудова областей керованих станів динамічного об'єкта. Запропоновано та досліджено математичну модель переміщення динамічного об'єкта в просторі спостереження. За результатами дослідження математичної моделі визначено параметри, які при певних припущеннях визначають співвідношення, що описують простір керованих станів в фізичному просторі переміщення об'єкта управління. В процесі дослідження визначено спосіб однозначного взаємного відображення параметрів, які характеризують переміщення динамічного об'єкта.

Ключові слова: математична модель, простір гарантованого управління, динамічний об'єкт, об'єкт управління, інформаційна множина.

Семко В. В., Чепіженко В. І. Построение областей управляемых состояний динамического объекта. Предложена и исследована математическая модель перемещения динамического объекта в пространстве наблюдения. В результате исследования математической модели выделены параметры, которые при некоторых допущениях определяют соотношения, которые описывают пространство управляемых состояний в физическом пространстве перемещения объекта управления. В процессе исследования определен способ однозначного взаимного отображения параметров, характеризующих перемещение динамического объекта.

Ключевые слова: математическая модель, пространство гарантированного управления, динамический объект, объект управления, информационное множество

Вступ. Постановка задачі. Проблема керованості динамічних систем (ДС) є самостійним напрямком теорії управління [1...4]. Незважаючи на отримані в останній час результати для нелінійних ДС [5...7], проблема керованості залишається невирішеною. Досить важкою ця проблема залишається для нелінійних власно-нестійких ДС та динамічних об'єктів (ДО), область керованості яких за умов обмежень на управління та фазові змінні за математичною моделлю не займають повністю простір станів ДС або ДО і має границю.

При дослідженні функціонування ДС та ДО з застосуванням математичної моделі визначається сукупність параметрів та їх кількісних характеристик, які при певних припущеннях визначають співвідношення між ними і описують функціонування реальної ДС та ДО в фізичному просторі переміщення. В такому разі встановлюється однозначне взаємне відображення параметрів, які характеризують переміщення ДС та ДО в фізичному просторі та параметрів, які визначають поведінку ДО в математичному просторі. В якості об'єкту дослідження обрано літальний апарат (ЛА) з визначеною математичною моделлю [8, 9].

Однією з центральних задач вирішення конфлікту в технічних системах [4, 10] є забезпечення цілісності та цілесюжності щодо управління ДО за умови забезпечення організованої ДС, яка складається з цілісних ДО, які є учасниками конфлікту.

Метою рішення задачі конфлікту є забезпечення цілісності ДС та ДО, які знаходяться в стані неорганізованого конфлікту, при збереженні цілей їх переміщення в просторі

спостереження (ПС). В такому разі ДО є об'єктом управління (ОУ) в ергатичній системі управління (ЕСУ), яка переміщується в ПС згідно синтезованих стратегій управління. В такому разі ЕСУ забезпечує адаптивне управління ДО в умовах конфлікту та невизначеності при забезпеченні основних принципів організмичної теорії ергатичних систем [1, 3, 4].

В такому разі важливим є забезпечення функціонального гомеостазису ЕСУ ДО як адаптивної системи з перестроюваною структурою із збереженням необхідного гомеостазису та доцільності переміщення ОУ в ПС. Синтез стратегії управління ДО визначається областями припустимих значень параметрів, які входять в математичну модель ДО.

З метою синтезу управлінь для ЕСУ ДО необхідно визначити його властивості шляхом побудови динамічного образу простору керованих та напівкерованих станів ОУ шляхом дослідження властивостей математичної моделі. В разі моделювання переміщення ОУ в ПС системою диференційних рівнянь дослідження властивостей простору управління ОУ здійснюється шляхом аналізу властивостей системи диференційних рівнянь, які описують переміщення істотно-нелінійного ДО. Простір рішень є безперервним, а рішення для ЕСУ ДО обираються за критерієм, який враховує особливості переміщення ергамату в ПС.

Актуальним є синтез алгоритмів розрахунку та формального відображення динамічного образу простору керованих та напівкерованих станів ОУ [11]. При перерізі динамічного образу простору керованих та напівкерованих станів ОУ площинами параметрів управління отримаємо відображення перерізу, який можна дослідити та обрати управління ЕСУ ДО [12]. Перерізи простору відображають множину можливих різноманітностей інваріантних функціональних поведінки ДС та ДО. Відображення динамічного образу простору керованих та напівкерованих станів ОУ має особливе значення при побудові ергатичних систем інтелектуального управління ДО при вирішенні задачі конфлікту взаємодії з відкритою множиною об'єктів спостереження в умовах обмежень та невизначеності.

Метою дослідження є опис алгоритмів розрахунку та формального відображення інформаційної множини динамічного образу керованих та напівкерованих станів ОУ на прикладі істотно-нелінійного ДО, яким є ЛА.

Розв'язання задачі. Динамічний образ простору керованих та напівкерованих станів нелінійного ОУ в перерізах простору площинами параметрів та управлінь в загальному випадку представляє геометричне місце усіх оптимальних траєкторій, побудованих в відповідному фазовому просторі. За умови безперервного управління динамічний образ простору керованих та напівкерованих станів може розглядатись як простір гарантованого управління ДО [7, 10, 11, 13].

В загальному випадку динаміку просторового руху ДО та керуючі впливи опишемо системою рівнянь, які визначаються вимогами міцності та складністю управління просторовим рухом ОУ.

$$v_n = \begin{cases} \frac{dv_1}{dt} = f_1(v_1, \dots, v_n, t, u_1, \dots, u_{n-r}); \dots \dots \frac{dv_1}{dt} = f_1(v_1, \dots, v_n, t, u_1, \dots, u_{n-r}); \\ v_{r+1} = u_{r+1}(v_1, \dots, v_n, t); \dots \dots v_n = u_n(v_1, \dots, v_n, t), \end{cases} \quad (1)$$

де $V(t) = \{v_1, \dots, v_r, t\}$ – множина параметрів математичної моделі; $U(t) = \{u_{r+1}, \dots, u_{n-r}, v_1, \dots, v_r, t\}$ – множина керуючих впливів; n – кількість рівнянь; r – кількість параметрів.

Границі областей управління динамічного образу простору керованих та напівкерованих станів нелінійного ОУ визначимо на прикладі математичної моделі просторового переміщення ЛА [8, 9].

Визначимо множини параметрів, які впливають на переміщення ДО за напрямками в тримірній ортогональній системі координат, яка є зв'язаною з ДО.

$$\begin{cases} X = \{x_1, \dots, x_q, u_{r+1}, \dots, u_n, t\}, X \subset V, g \leq n; \\ Y = \{y_1, \dots, y_s, u_{r+1}, \dots, u_n, t\}, Y \subset V, s \leq n; \\ Z = \{z_1, \dots, z_w, u_{r+1}, \dots, u_n, t\}, Z \subset V, w \leq n. \end{cases} \quad (2)$$

В такому разі диференційні рівняння системи (1) можна представити у вигляді:

$$\dot{P}_x = F_x(X, Y, Z); \quad \dot{P}_y = F_y(X, Y, Z); \quad \dot{P}_z = F_z(X, Y, Z), \quad (3)$$

де $\dot{P}_x = \frac{dX}{dt}$, $\dot{P}_y = \frac{dY}{dt}$, $\dot{P}_z = \frac{dZ}{dt}$, (P_x, P_y, P_z) – множини значень параметрів для зміни напрямку переміщення ДО вздовж відповідних вісей зв'язаної системи координат ОУ.

Визначимо систему рівнянь (3), яка описує поведінку ДО при наявності керуючого пристрою для системи інтелектуальної управління (СІУ) або ЕСУ у вигляді

$$\dot{P}_x = K_x(P_x - X); \quad \dot{P}_y = K_y(P_y - Y); \quad \dot{P}_z = K_z(P_z - Z). \quad (4)$$

В співвідношенні (4) K_x, K_y, K_z є коефіцієнтами передачі регулятора СІУ або ЕСУ, які враховують вимоги щодо якості процесу управління ДО.

Визначимо співвідношення для розрахунку простору значень припустимих кутових швидкостей при просторовому переміщенні ЛА. За математичною моделлю просторового переміщення ЛА [8] маємо:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_x = \frac{1}{K_{\omega_x}} \left(\frac{Sl\rho V^2}{2J_x} \left(m_x^{cm} + \frac{l}{2V} m_x^{ep} \right) + \frac{J_y - J_z}{J_x} \omega_y \omega_z \right) \\ \dot{\omega}_y = \frac{1}{K_{\omega_y}} \left(\frac{Sl\rho V^2}{2J_y} \left(m_y^{cm} + \frac{l}{2V} m_y^{ep} \right) + \frac{J_z - J_x}{J_y} \omega_x \omega_z \right) \\ \dot{\omega}_z = \frac{1}{K_{\omega_z}} \left(\frac{Sl\rho V^2}{2J_z} \left(m_z^{cm} + \frac{b_A}{V} m_z^{ep} \right) + \frac{J_x - J_y}{J_z} \omega_x \omega_y \right) \end{cases} \quad (5)$$

де: J_x, J_y, J_z – проекції головного моменту інерції на вісі координат; S – площа крила; l – довжина крила; V – модуль вектора швидкості; ρ – щільність повітря; b_A – довжина середньої аеродинамічної хорди крила; $m_x^{cm}, m_y^{cm}, m_z^{cm}, m_x^{ep}, m_y^{ep}, m_z^{ep}$ – проекції моментів, які визначають обертання ЛА навколо центра мас.

Моменти в співвідношенні (5) згідно математичній моделі просторового переміщення ЛА залежать від певних параметрів: α – кут атаки; β – кут ковзання; δ_n – кут відхилення керма напрямків; δ_e – кут відхилення елеронів; δ_i – кут відхилення інтерцепторів; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекції вектора кутової швидкості; ϕ_{cm} – кут встановлення стабілізатора.

Згідно моделі просторового переміщення ЛА маємо:

$$\begin{cases} m_x^{cm} = m_x^{cm}(\alpha, \beta, \delta_\alpha, \delta_n, \delta_e); & m_y^{cm} = m_y^{cm}(\alpha, \beta, \delta_\alpha, \delta_n); & m_z^{cm} = m_z^{cm}(\alpha, \delta_\alpha, \delta_e, \delta_i, \phi_{cm}); \\ m_x^{ep} = m_x^{ep}(\alpha, V, \omega_x, \omega_y, \delta_\alpha); & m_y^{ep} = m_y^{ep}(\alpha, \delta_\alpha, \omega_x, \omega_y); & m_z^{ep} = m_z^{ep}(\omega_z). \end{cases} \quad (6)$$

Представивши співвідношення (4) з врахуванням співвідношення (5) визначимо значення припустимих кутових швидкостей ЛА:

$$\begin{cases} P_{\omega_x} = \frac{1}{K_{\omega_x}} \left(\frac{Sl\rho V^2}{2J_x} \left(m_x^{cm} + \frac{l}{2V} m_x^{ep} \right) + \frac{J_y - J_z}{J_x} \omega_y \omega_z \right) - \omega_x \\ P_{\omega_y} = \frac{1}{K_{\omega_y}} \left(\frac{Sl\rho V^2}{2J_y} \left(m_y^{cm} + \frac{l}{2V} m_y^{ep} \right) + \frac{J_z - J_x}{J_y} \omega_x \omega_z \right) - \omega_y \\ P_{\omega_z} = \frac{1}{K_{\omega_z}} \left(\frac{Sl\rho V^2}{2J_z} \left(m_z^{cm} + \frac{b_A}{V} m_z^{ep} \right) + \frac{J_x - J_y}{J_z} \omega_x \omega_y \right) - \omega_z \end{cases} \quad (7)$$

Обчислення множин припустимих значень кутових швидкостей $P_{\omega_x}, P_{\omega_y}, P_{\omega_z}$ при переміщенні ЛА здійснюється послідовно для кожного моменту часу переміщення ОУ. Тобто з моменту початку процесу управління ДО t_0 до моменту закінчення процесу

управління t_k маємо співвідношення, яке визначає динаміку зміни множини припустимих кутових швидкостей в часі за умови приналежності управління ДО за математичною моделлю згідно співвідношення (1):

$$\overline{P_{\omega_x}} = \{P_{\omega_x}(t_0), \dots, P_{\omega_x}(t_k)\}; \quad \overline{P_{\omega_y}} = \{P_{\omega_y}(t_0), \dots, P_{\omega_y}(t_k)\}; \quad \overline{P_{\omega_z}} = \{P_{\omega_z}(t_0), \dots, P_{\omega_z}(t_k)\}. \quad (8)$$

Побудова множин припустимих значень кутових швидкостей при переміщенні ДО для моменту часу t_i може бути визначена як

$$\overline{P_{\omega_x}^*}(t_i) = \bigcap_{j=0}^i P_{\omega_x}(t_j); \quad \overline{P_{\omega_y}^*}(t_i) = \bigcap_{j=0}^i P_{\omega_y}(t_j); \quad \overline{P_{\omega_z}^*}(t_i) = \bigcap_{j=0}^i P_{\omega_z}(t_j). \quad (9)$$

Співвідношення (8) і (9) визначають різноманітність стратегій управління ДО. За співвідношенням (9) фактично отримуємо багатомірний конус простору станів та гарантованого управління ДО.

Обчислення значень припустимих кутових швидкостей та прискорень здійснюється для множини припустимих швидкостей та висот для певних режимів польоту ЛА та можливих значень параметрів управління ДО. Слід зазначити, що розмір та форма простору гарантованого управління ЛА залежить від показників якості процесу управління K_{ω_x} , K_{ω_y} , K_{ω_z} для кутових швидкостей, які входять в співвідношення (7).

Значення кутових швидкостей ω_x , ω_y , ω_z , які визначають з співвідношень (5) та (7), надалі використовуються для розрахунку значень інших істотних змінних, які визначають переміщення ЛА.

Гомеостатичність управління ДО визначаються співвідношенням (9) за умови:

$$\overline{P_{\omega_x}^*}(t_i) \neq \emptyset, \forall t_i \in [t_0, \dots, t_k]; \quad \overline{P_{\omega_y}^*}(t_i) \neq \emptyset, \forall t_i \in [t_0, \dots, t_k]; \quad \overline{P_{\omega_z}^*}(t_i) \neq \emptyset, \forall t_i \in [t_0, \dots, t_k]. \quad (10)$$

Співвідношення (10) описують умову безперервності простору гарантованого управління ДО в режимі стабілізації переміщення ОУ.

За імітаційним експериментом, який було проведено на моделі просторового переміщення сучасного ЛА, було отримано результати, представлені на Рис. 1.

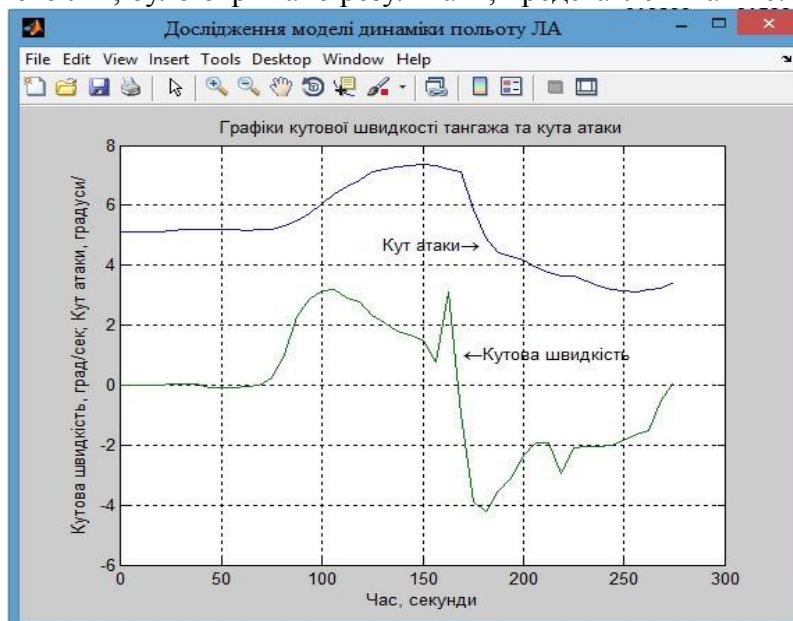


Рис. 1. Зміни в часі кутової швидкості тангажа ω_x та кута атаки α .

При моделюванні в якості опорного переміщення було обрано прямолінійний горизонтальний політ. В якості вихідних значень розрахованих параметрів просторового переміщення ЛА було обрано кутову швидкість тангажа ω_x та кут атаки α , а параметром управління обрано відхилення керма висоти δ_e .

За обчисленими даними, які представлено на Рис.1, було отримано фазову траєкторію в перерізі простору керованих станів для параметрів ω_x та α (Рис. 2).

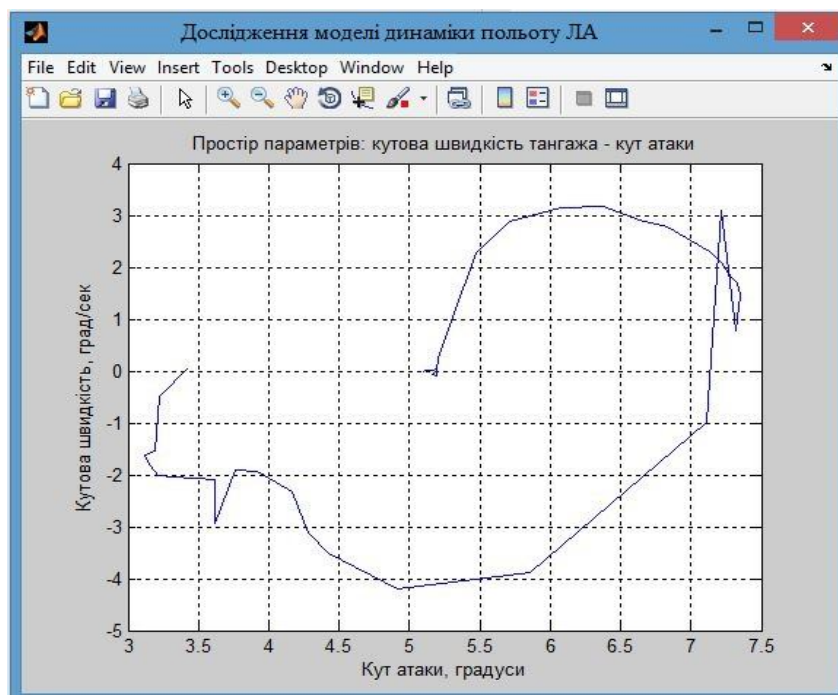


Рис. 2. Фазова траєкторія ω_x та α в перерізі простору керованих станів ЛА.

Множина фазових траєкторій може бути отримана в процесі здійснення перебору в границях обмежень на значення параметрів системи (1) та можливих керуючих впливів на ДО.

Висновки. За результатами дослідження функціонування ДС та ДО з застосуванням математичної моделі визначено параметри, які при певних припущеннях визначають співвідношення між ними і описують простір керованих станів в фізичному просторі переміщення ОУ. При цьому визначено спосіб однозначного взаємного відображення параметрів, які характеризують переміщення ОУ в фізичному просторі та параметрів, які визначають поведінку ДО в математичному просторі.

Запропонований підхід дозволяє визначати припустимі граничні відхилення органів управління ДО на певних етапах переміщення ОУ в просторі спостереження.

Можливість визначення простору гарантованого управління ДО дозволяє вирішувати задачу конфлікту взаємодії ОУ з відкритою множиною об'єктів спостереження в умовах обмежень.

В такому разі синтез стратегій управління для СІУ та ЕСУ ДО може здійснюватись за методом інтегрального усікання варіантів [14...16] для певної моделі конфлікту [17, 18].

В якості прикладу для істотно-нелінійного ДО, яким є ЛА, здійснено розрахунок та формальне відображення інформаційної множини динамічного образу керованих та напівкерованих станів ОУ.

Література

1. Касьянов В. А. Субъективный анализ: Монография / В. А. Касьянов. – Київ : НАУ, 2007. – 512 с.
2. Павлов В. В. Инвариантность и автономность нелинейных систем управления / В. В. Павлов. – Київ : Наукова думка, 1975. – 272 с.
3. Павлов В. В. Начала теории эргатических систем / В. В. Павлов. – Київ : Наукова думка, 1975. – 240 с.

4. Павлов В. В. Конфликты в технических системах / В. В. Павлов. – Київ : Вища школа, 1982. – 184 с.
5. Павлова С. В. Метод гарантованого оцінювання області повністю керованого стану складної нелінійної динамічної системи / С. В. Павлова, В. В. Павлов, В. І. Чепіженко // Вісник Національного авіаційного університету. – 2011. – №2. – С. 27-32.
6. Рогалев А. Н. Расчет включений фазовых состояний в задачах наблюдений за движением самолета / А. Н. Рогалев, А. А. Рогалев // Вестник СибГАУ. – 2012. – №1. – С. 53-57.
7. Курьянов А. И. Об областях управляемости динамическими системами при ограничениях на управление и фазовые переменные / А. И. Курьянов // Ученые записки ЦАГИ. – 1988. – №5. – С. 100-112.
8. Аэродинамика, устойчивость и управляемость сверхзвуковых самолетов / под ред. Бюшгенса Г. С. – Москва : Наука. Физмалит, 1998. – 811 с.
9. Харченко В. П. Авіоніка безпілотних літальних апаратів / В. П. Харченко, В. І. Чепіженко, А. А. Тунік, С. В. Павлова. – Київ: ТОВ «Абрис-принт», 2012. – 464 с.
10. Семко В. В. Применение теории конфликта в задаче предотвращения столкновений воздушных судов / В. В. Семко, В. В. Павлова // Методы и средства оценки уровня безопасности полетов гражданских воздушных судов. – Киев : КИИГА, 1985. – С.97-102.
11. Павлов В. В. Технические эргатические системы / В. В. Павлов, А. Н. Воронин, В. Н. Голего, А. М. Мелешев, О. С. Яковлев. – Київ : Вища школа, 1977. – 344 с.
12. Семко В. В. Дослідження властивостей рішення задачі конфлікту за методом інтегрального усікання варіантів / В. В. Семко, О. В. Семко // Проблеми інформатизації та управління. – 2014. – Вип. 2(46). – С. 60-71.
13. Семко В. В. Построение области безопасного маневра при расхождении судов / В. В. Семко, В. В. Павлова. – Киев : КИИГА. – 1989. – 13 с. Деп. в ЦНТИГА 14.02.90., N789-ГА90.
14. Семко В. В. Построение области безопасного маневра при расхождении судов / В. В. Семко, В. В. Павлова / Киев. ин-т инж. гражд. авиации. – Киев: 1989. – 13с. Деп. в ЦНТИГА 14.02.90., № 789-ГА90.
15. Семко В. В. Використання методу інтегрального усікання варіантів при вирішенні задач конфлікту взаємодії об'єктів в просторі спостереження / В. В. Семко // Інформаційні та телекомунікаційні технології. – 2015. – № 1. – С. 59-66.
16. Семко В. В. Эвристический метод построения рекурсивного алгоритма принятия решений в условиях конфликта / В. В. Семко. – Киев : КИИГА. – 1989. – 14 с. – Деп. в ЦНТИГА 14.02. 90, № 788-ГА90.
17. Семко В. В. Формальный опис простору пошуку при синтезі рішень / В. В. Семко // Проблеми інформатизації та управління. – 2013. – Вип. 2(42). – С.104-111.
18. Кравченко Ю. В. Функціональна стійкість – властивість складних технічних систем / Ю. В. Кравченко, О. В. Барабаш // Труды академії. – 2002. – Бюл. 40. – С. 225-282.

Автори статті

Семко Віктор Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційної та кібернетичної безпеки, Державний університет телекомунікацій, м. Київ. Тел. +380 (50) 3302630. E-mail: semko_viktor@mail.ru

Чепіженко Валерій Іванович, доктор технічних наук, професор кафедри аеронавігаційних систем, Національний авіаційний університет, м. Київ. Тел.: +380 (99) 4372807. E-mail: chiv@nau.edu.ua

Дата надходження в редакцію: 10.08.2015 р. Рецензент: д.т.н., доц. В. Л. Бурячок