

Technologies (JNCET) Volume 5, Special Issue 2, December, 2015 – pp. 137-142

18. https://www.researchgate.net/post/How_do_you_simulate_WSN_with_Ns2_Is_NS2_or_NS3_better.

19. <https://www.omnetpp.org/intro>.

20. *András Varga, Rudolf Hornig*, An overview of the OMNeT++ simulation environment, Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops, SimuTools 2008, Marseille, France, March 3-7, 2008.

21. *X. Xian, W. Shi, H. Huang*, Comparison of OMNET++ and other simulator for WSN simulation, 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications 2008. ICIEA 2008, 2008 – pp. 1439-1443.

22. *A. Varga*, Parallel Simulation Made Easy With OMNeT++, 2009.

23. <https://www.anylogic.com/upload/iblock/fd4/fd4d353e5afbbdf421ff4efea586373c.pdf>

24. *V.G. Gavrilenko, A. Yu. El'tsov, A. A. Kiryushin, S. V. Lobanov, and A. N. Sadkov*, Detailed Simulation of the Physical Level in a Simulator of Wireless Sensor Networks, Radiotekhnika i Elektronika, 2009, Vol. 54, No. 4, pp. 465–475.

25. *Кузьмін О., Головка В.* Оптимізація кластерної структури сенсорної мережі методом імітаційного моделювання. // Вісник НУ “Львівська політехніка”, № 663, Комп'ютерні науки та інформаційні технології. - Львів, 2010, с.103-107.

Поступила 22.02.2018р.

УДК 629.7.072.8

О.А. Машков¹, д.т.н., проф., Б.В.Дурняк², д.т.н., проф., Ю.В. Мамчур¹,
О.В. Тимченко^{2,3}, д.т.н., професор

СИНТЕЗ АЛГОРИТМУ ПРОГРАМНОГО КЕРУВАННЯ НА ТРЕНАЖЕРІ ДИСТАНЦІЙНО ПІЛОТОВАНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА НА ОСНОВІ АЛГОРИТМІЧНОЇ ПРОЦЕДУРИ РІШЕННЯ ЗВОРотноЇ ЗАДАЧІ ДИНАМІКИ (СТОХАСТИЧНА ПОСТАНОВКА)

Запропонована методика синтезу керування дистанційно пілотованим літальним апаратом в умовах нештатних (аварійних) ситуацій в імітаторі динаміки польоту тренажера. Розроблено алгоритмічний підхід до синтезу програмного керування у стохастичній постановки. Запропоновані теоретичні положення розглянуто на модельному прикладі.

Ключові слова: алгоритм керування, дистанційно пілотований літальний апарат, ефективність керування, оптимізація, об'єкт керування, оперативне програмування траєкторія, стохастична система.

¹ Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, Київ

² Українська академія друкарства, Львів

³ Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

A technique for synthesizing the control of a remotely piloted aircraft in conditions of abnormal (emergency) situations in the simulation simulator of flight simulator is proposed. An algorithmic approach to the synthesis of program control in a stochastic formulation is developed. The offered theoretical positions are considered on the model example.

Keywords: control algorithm, remotely piloted aircraft, control efficiency, optimization, control object, operational programmable trajectory, stochastic system.

Вступ. Розроблені конструктивні процедури побудови оптимальних алгоритмів дозволяють розв'язати багато задач проектування авіаційних тренажерів систем за допомогою відомих методів теорії автоматичного керування: принцип максимуму, динамічне програмування, методи моментів, функції Ляпунова, аналітичне конструювання регуляторів, класичне варіаційне числення [1-9]. Пропонується для побудови тренажера дистанційно пілотованого літального апарата застосувати концепцію конструювання алгоритмів керування рухом з позицій обернених задач динаміки [1-7]. Цей підхід може розглядатися як у детермінованій так й у стохастичній постановки. У статті розглянуто стохастичний підхід, який запропоновано реалізувати у тренажері дистанційно пілотованого літального апарату при відпрацюванні оператором дій в умовах нештатних (аварійних) ситуацій Застосування концепції конструювання алгоритмів керування рухом з позицій обернених задач дозволяє побудувати ефективні прийоми пошуку керувань, що особливе для тренажерів, які працюють у реальному часі. Така постановка задачі відкриває можливості побудови систем керування на основі конструктивних схем, які принципово відмінні від звичайних.

Алгоритм стабілізації ДПЛА на оперативне-програмованій траєкторії в умовах нештатних ситуацій.

Для моделювання нештатних ситуацій в імітаторі динаміки польоту пропонується використовувати рівняння стохастичного руху ДПЛА у вигляді

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) + G\xi(t), \quad (1)$$

де $U(t)$ – m -вимірний вектор керуючих функцій; $\xi(t)$ – r -вимірний вектор випадкових збурень.

Вважаємо матриці A , B , G заданими. Відносно вектор-функції, припускається, що вона володіє такими властивостями

$$M[\xi(t)] = 0, \quad M[\xi(t)\xi^T(t-\tau)] = P_\xi(t)\delta(t-\tau). \quad (2)$$

Матриця P_ξ розмірності (r, r) характеризує інтенсивність випадкових збурень і вважається відомою.

Рівняння вимірника має вигляд

$$Z(t) = HX(t) + \eta(t), \quad (3)$$

де $\eta = (\eta_1 \dots \eta_k)^T$ – вектор випадкових похибок, що володіє такими властивостями

$$M[\eta(t)] = 0, \quad M[\eta(t)\eta^T(t-\tau)] = P_\eta(t)\delta(t-\tau).$$

Матриця P_η розмірності (k, k) характеризує інтенсивність завади $\eta(t)$.

Вважаємо також, що процеси $\zeta(t)$ і $\eta(t)$ статистично незалежні. Це допущення відповідає багатьом прикладним задачам.

Рівняння (1) розглядатимемо як модель збуреного руху. У такому випадку задача керування полягає в тому щоб утримувати систему в околиці початку координат

$$X(t) \rightarrow O_{(n)}.$$

Розрізнятимемо два режими керування:

– збурений по математичному очікуванню при $M[X(t)] \neq O_{(n)}$,

– незбурений, у випадку $M[X(t)] = O_{(n)}$.

Практично режим керування можна вважати збуреним, якщо значення $M[X(t)]$ суттєво перевищують прийнятий рівень випадкових складових координат вектора стану. Якщо має місце зворотне співвідношення, то режим керування можна вважати незбуреним. Для забезпечення високої якості роботи система повинна мати різні динамічні характеристики, відповідні різним режимам її функціонування.

Для збуреного режиму закон керування слід синтезувати з умови здійснення призначеної траєкторії руху з точки $M[X(0)]$ у початок координат.

У незбуреному режимі закон керування повинен забезпечувати рух керованого об'єкта в можливо меншій околиці початку координат.

Таким чином, параметри закону керування слід визначати по різних критеріях. Розглянемо ці питання.

Закон керування рухом даної системи приймаємо у вигляді

$$U = CZ(t) = CHX(t) + C\eta(t),$$

$$M[\eta(t)] = 0,$$

(4)

$$M[\eta(t)\eta^T(t)] = P_\eta(+)\delta(t - \tau).$$

Матриця параметрів $C = \{C_{ij}\}$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, k}$ підлягає визначенню.

Для збуреного по математичному очікуванню $M[X(t)]$ режиму керування параметри $\{C_{ij}\}$ визначаються в результаті оптимізації детермінованої системи

$$\dot{M}[X(t)] = AM[X(t)] + BM[U(t)];$$

$$M[U(t)] = CHM[X(t)].$$

(5)

Для незбуреного (по математичному очікуванню) режиму параметри закону керування визначаються з умови, щоб дисперсії координат стану були мінімальними в кожен момент часу.

Для стохастичної системи мінімум дисперсії вихідних координат

досягається в тому, випадку, коли для кожного $t > 0$ похідна $\dot{D}(t, C)$ приймає екстремальне значення в просторі параметрів C_j . Це у свою чергу має місце, якщо C_j задовольняють системі рівнянь

$$\frac{\partial D(t, C)}{\partial C_j} = 0, \quad j = \overline{1, k}.$$

Параметри, що задовольняють цій умові $|C_1^\sigma \dots C_k^\sigma| = C_\sigma^T$ називатимемо оптимальними.

Щоб знайти необхідні розрахункові співвідношення для C_σ слід виконати диференціювання $d_{ii}(t, C)$ по C_{ij} .

Діагональні елементи матриці $D(t, C)$ можна диференціювати по векторах C_i , що дає систему векторних рівнянь

$$\frac{d}{dC_i} (e_i^T D e_i) = 0, \quad i = \overline{1, k} \quad (6)$$

де

$$e_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}, \dots, e_k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Вирішуючи рівняння (41) можна отримати

$$B C_\sigma P_\eta(t) + D_d(t) \cdot H^T = 0.$$

Матриця $D_\sigma(t)$, що входить у цей вираз визначається при оптимальному значенні $C = C_\sigma$, яке дорівнює

$$\sigma_0(t) = -(B^T B)^{-1} B^T D_\sigma(t) H^T P_\eta^{-1}(t). \quad (7)$$

Очевидно, що для незбуреного (по математичному очікуванню) режиму керування параметри залежать від часу. Це обумовлено двома причинами. Одна з них полягає в тому, що інтенсивність $P_\eta(t)$ похибок вимірювання не постійна. Друга причина полягає в тому, що навіть при стаціонарному випадковому процесі $\eta(t)$ вектор $C_\sigma = C_\sigma(t)$, оскільки матриця $D_\sigma(t)$ других центральних моментів в перехідному процесі змінюється в часі.

Диференціальне рівняння для $D_\sigma(t)$ можна отримати із загального рівняння з урахуванням (7)

$$\dot{D}_\sigma(t) = A D_\sigma(t) + D_\sigma(t) A^T = R Q_\sigma(t) R^T + G P_\xi(t) G^T, \quad (8)$$

де позначено

$$R = B(B^T B)^{-1} B^T; \quad Q_\sigma(t) = D_\sigma(t) H^T P_\eta^{-1}(t) H D_\sigma(t);$$

$$R = R^T; \quad Q_{\sigma}(t) = Q_{\sigma}^T(t).$$

Рішення $D_{\sigma}(t)$ матричного рівняння (8) використовується при обчисленні $C_{\sigma}(t)$ за формулою (7). В якості початкової умови $D_{\sigma}(0)$ для рівняння (8) можна приймати деяке апріорне значення, виходячи з допустимого рівня шумів проєктованої системи, тобто питання це вирішується з урахуванням особливостей проєктованої системи і умов її функціонування.

Проте, при виконанні обчислювальних процедур, можна як початкові умови прийняти $D_{\sigma}(0) = 0$.

Зазвичай в практиці приймається, що випадкова функція $\xi(t)$ стаціонарна, тобто $\sigma_{\xi}(t) = \text{const}$, похибки вимірювання $\eta_i(t)$ також є стаціонарними випадковими функціями $P_n = \text{const}$. Стале значення $D_{\sigma}(\infty) = \text{const}$, отже згідно (7) оптимальне значення $C_{\sigma}(\infty) = \text{const}$.

Модельний приклад. Оцінимо ефективність алгоритму керування на основі вирішення зворотного задачі динаміки для стохастичної багатовимірної автоматичної системи.

Розглянемо систему

$$\dot{X}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -0,3 & -3 & -0,1 \end{bmatrix} \cdot X(t) + \begin{bmatrix} 2 & 1 & 4 \\ 0 & 3 & 2 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot U(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \xi(t).$$

Рівняння вимірника має вигляд

$$Z(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot X(t) + \eta(t).$$

Характеристики випадкових функцій мають вигляд

$$\sigma_{\xi}^2 = 0,01; \quad P_{\eta} = \begin{bmatrix} 0,01 & 0 \\ 0 & 0,01 \end{bmatrix}.$$

Для збуреного (по математичному очікуванню) режиму параметри закону керування визначені з умови наближення $X(t)$ до вектору стану $Y(t)$ системи

$$\dot{Y}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -3 & -3 \end{bmatrix} \cdot Y(t).$$

Як міра наближення $X(t) \rightarrow Y(t)$ прийнятий функціонал

$$J(c) = \int_0^T [X(t,c) - Y(t)]^T V [X(t,c) - Y(t)] dt,$$

$$V = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Оптимальні параметри для збуреного режиму дорівнюють

$$\{C_{ij}^*\} = \begin{bmatrix} 0,386 & 6,308 \\ 0,009 & 1,666 \\ -0,197 & -3,672 \end{bmatrix}.$$

На рис. 1 приведені графіки, що характеризують зміну середньоквадратичних значень $\sigma_{ij} = \sqrt{\alpha_{ij}}$ координат стану X_i для того випадку, коли закон керування $U(x) = CHX$. Аналізуючи приведені на рис. 1 залежності можна зробити такі висновки:

1. Рівень випадкових складових в координаті стану дуже високий.

2. Параметри C_{ij}^* , знайдені для збуреного (по математичному очікуванню) режиму керування, не можна визнати оптимальними для незбуреного режиму.

На рис. 2 приведені залежності середньоквадратичних значень $\sigma_{ij}^{\min}(t)$, які отримані для закону керування

$$U(x) = C_\sigma Z,$$

синтезованого з умови реалізації мінімальних дисперсій в кожен момент часу.

Ці дані відповідають тому випадку, коли початкове значення $D_\sigma(0)$ прийнято рівним сталому значенню матриці $D(t)$, отриманої для системи з параметрами $C = C^*$. Оптимальні значення параметрів C_{ij}^σ змінюються в процесі керування, тобто є функцією часу (рис. 3).

У сталому режимі

$$\{C_{ij}^\sigma(\infty)\} = \begin{bmatrix} 0,845 & -0,116 \\ 0,557 & -0,077 \\ -0,786 & 0,199 \end{bmatrix}.$$

Таким чином, на основі сформульованого поняття функціональної стійкості і запропонованих методів синтезується відновлююче керування, що забезпечує виведення динамічної системи з нештатних ситуацій.

Подальшим етапом досліджень планується моделювання і оцінка ефективності розроблених алгоритмів.

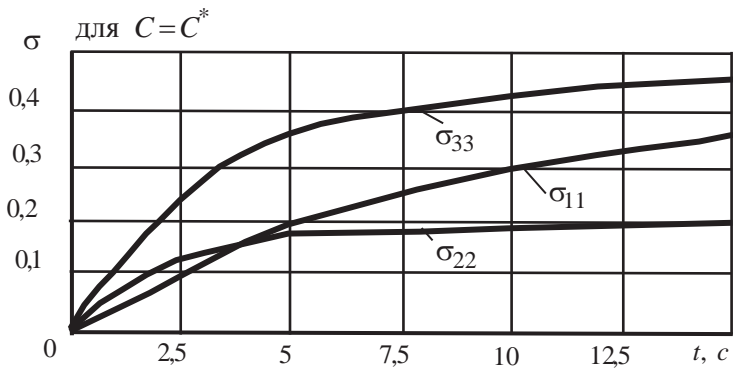


Рис. 1 – Графік зміни середньоквадратичних значень $\sigma_{ij} = \sqrt{\alpha_{ij}}$

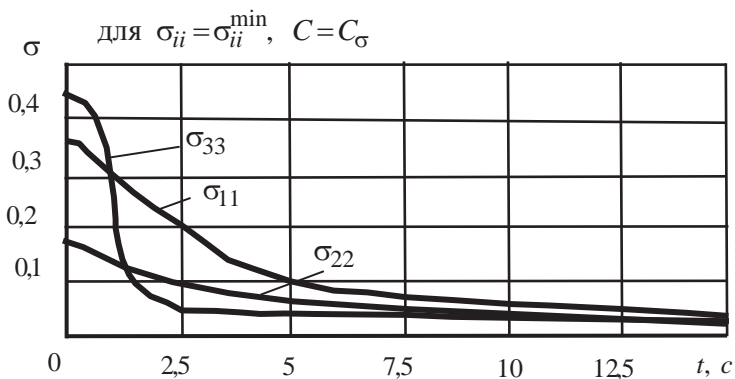


Рис. 2 – Графік зміни середньоквадратичних значень для закону керування $\sigma_{ij}^{\min}(t)$

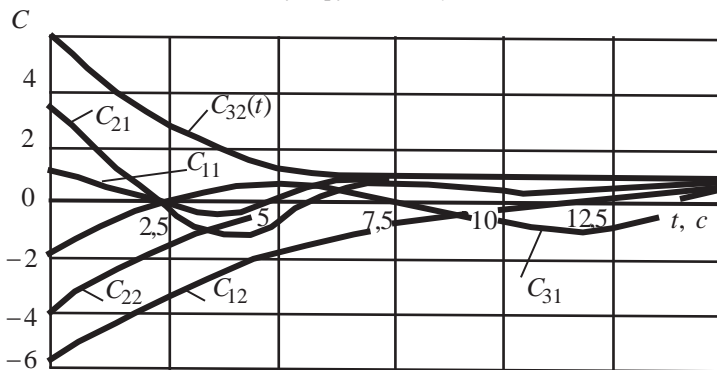


Рис. 3 – Графік оптимальних значень параметрів C_{ij}^{σ} в процесі керування

Висновки. На основі алгоритмічної процедури розв'язання зворотних задач динаміки запропонована методика синтезу керування дистанційно пілотованим літальним апаратом в умовах нештатних (аварійних) ситуацій в імітаторі динаміки польоту тренажеру. Алгоритмічний підхід до синтезу програмного керування у стохастичній постановки можливо застосовувати при розробці тренажеру дистанційно пілотованого літального апарату екологічного моніторингу при відпрацюванні саме нештатних (аварійних) ситуацій. Відпрацювання дій оператора при виникненні нештатних ситуацій можливе здійснювати шляхом моделювання в імітаторі динаміки польоту стохастичних рівнянь динаміки руху. Застосування алгоритму стабілізації на оперативне програмованій траєкторії на основі рішення зворотної задачі динаміки забезпечує мінімум дисперсії вихідних координат, що характеризує ефективність відпрацювання програмної траєкторії руху.

1. *Петров Б.Н., Крутько П.Д.* Конструирование алгоритмов управления полетом на основе решения обратных задачи динамики. Продольное движение. М., Техническая кибернетика, №2, 1981, с. 162-170.
2. *Артюшин Л.М., Панов В.И., Шамо́в Г.В.* Синтез алгоритмов управления полета на основе решения обратных задач динамики. Киев : КВВАИУ, 1982, 44с.
3. *Маишков О.А.* Некоторые особенности синтеза системы автоматического управления полетом летательного аппарата на основе решения обратной задачи динамики / Отдельный тематический научно-технический сборник. К.:КВВАИУ, 1985, С. 49-51.
4. *Маишков О.А.* Структура системы управления угловым положением самолета с заданными динамическими характеристиками / Научно-методические материалы по вопросам повышения эффективности и надежности систем авиационного оборудования. – К.:КВВАИУ, 1985, С. 39-42.
5. *Галиуллин А.С.* Методы решения обратных задач динамики. М.: Наука, 1986, 224 с.
6. *Маишков О.А.* Особенности применения метода обратных задач динамики для многомерных систем автоматического управления / Научно-методический сборник, Вып.1. Оборудование летательных аппаратов. - К.: КВВАИУ, 1987, С. 47-49.
7. *Маишков О.А.* Синтез многомерных автоматических систем на основе решения обратных задач динамики. К.: КВВАИУ, 1989, 76 с.
8. *Артюшин Л.М., Маишков О.А., Сивов Н.С.* Теория автоматического управления. К.: КИ ВВС, 1996, 686 с.
9. Теорія автоматичного керування / *Л.М. Артюшин, О.А. Маишков, Б.В. Дурняк, М.С. Сивов.* – Львів: Вид-во УАД, 2004. – 272 с.

Поступила 5.03.2018р.