УДК 623.746-*519* DOI: 10.31673/2412-4338.2024.046475

Корнага Ярослав Ігорович
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ
ORCID: 0000-0001-9768-2615

Ткач Михайло Мартинович
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ
ORCID: 0000-0002-7152-4720

Солдатова Марія Олександрівна
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ
ORCID: 0000-0003-1233-1272

Марченко Олена Іванівна
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ
ORCID: 0000-0001-5754-4920

СТАБІЛІЗАЦІЯ АВТОНОМНОГО ПРОГРАМНОГО ПОЛЬОТУ БПЛА В УМОВАХ ПАРАМЕТРИЧНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Анотація. *Стаття присвячена розробці методу корекції зворотних зв'язків замкненої динамічної системи з параметричною невизначеністю, яка забезпечує стабілізацію програмного руху БПЛА із заданими показниками якості перехідних процесів. Синтез робастного регулятора базується на концепції допустимості, яка використовує в якості оцінки первинні показники якості перехідних процесів, такі як час переходу, динамічна і статична точність та інші. Результати моделювання динаміки руху БПЛА з параметричною невизначеністю показали, що перехідні процеси в системі стабілізації відповідають заданим показникам якості перехідних процесів і гарантовано забезпечують стійкість динаміки руху БПЛА. В реальних умовах параметри великих БПЛА літакового типу і обурень, що діють на них, можуть бути відомі неточно або визначені неоднозначно. Інформація про параметричну невизначеність може обмежуватися лише межами областей зміни параметрів, заданих, наприклад, технічними допусками. У таких умовах доводиться мати справу з сімейством динамічних систем, параметри яких можуть набувати будь-яких значень у заданих межах. Таким чином, проблема аналізу та забезпечення стійкості систем з невизначеністю займає одне з центральних місць у теорії та практиці управління. Стаття присвячена розробці методу корекції зворотних зв'язків замкненої динамічної системи з параметричною невизначеністю, яка забезпечує стабілізацію програмного руху БПЛА із заданими показниками якості перехідних процесів. Синтез робастного регулятора базується на концепції допустимості, яка використовує в якості оцінки первинні показники якості перехідних процесів, такі як час переходу, динамічна і статична точність та інші. Результати моделювання динаміки руху БПЛА з параметричною невизначеністю показали, що перехідні процеси в системі стабілізації відповідають заданим показникам якості перехідних процесів і гарантовано забезпечують стійкість динаміки руху БПЛА.*

Ключові слова: *БПЛА, лінеаризована модель динаміки руху, параметрична невизначеність, метод корекції зворотних зв'язків, динамічні показники якості, стійкість руху БПЛА*

Kornaga Yaroslav
National Technical University of Ukraine «Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv
ORCID: 0000-0001-9768-2615

Tkach Mikhail
National Technical University of Ukraine «Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv
ORCID: 0000-0002-7152-4720

Soldatova Mariya
National Technical University of Ukraine «Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv
ORCID: 0000-0003-1233-1272

Marchenko Olena
National Technical University of Ukraine «Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv
ORCID: 0000-0001-5754-4920

STABILIZATION OF AUTONOMOUS PROGRAM FLIGHT OF UAVS UNDER CONDITIONS OF PARAMETRIC UNCERTAINTY

Abstract. *The article is devoted to the development of a method for correcting feedback loops of a closed-loop dynamic system with parametric uncertainty, which provides stabilization of the UAV program movement with given indicators of the quality of transient processes. The synthesis of a robust controller is based on the concept of admissibility, which uses as an assessment the primary indicators of the quality of transient processes, such as transition time, dynamic and static accuracy, and others. The results of modeling the dynamics of UAV movement with parametric uncertainty showed that the transient processes in the stabilization system correspond to the given indicators of the quality of transient processes and are guaranteed to ensure the stability of the dynamics of UAV movement. In real conditions, the parameters of large aircraft-type UAVs and the disturbances acting on them may be known inaccurately or determined ambiguously. Information about parametric uncertainty may be limited only to the boundaries of the areas of parameter change, given, for example, by technical tolerances. In such conditions, one has to deal with a family of dynamic systems, the parameters of which can take on any values within the given limits. Thus, the problem of analyzing and ensuring the stability of systems with uncertainty occupies one of the central places in the theory and practice of control. The article is devoted to the development of a method for correcting feedback loops of a closed-loop dynamic system with parametric uncertainty, which provides stabilization of the UAV program movement with given indicators of the quality of transient processes. The synthesis of a robust controller is based on the concept of admissibility, which uses as an assessment the primary indicators of the quality of transient processes, such as transition time, dynamic and static accuracy, and others. The results of modeling the dynamics of UAV movement with parametric uncertainty showed that the transient processes in the stabilization system correspond to the given indicators of the quality of transient processes and are guaranteed to ensure the stability of the dynamics of UAV movement.*

Keywords: *UAV, linearized model of movement dynamics, parametric uncertainty, method for correcting feedback loops, dynamic quality indicators, stability of UAV movement*

Вступ. Розвиток сучасних і перспективних технологій дозволяє сьогодні БПЛА успішно виконувати функції, які у минулому виконувалися іншими силами та засобами. Результати аналізу війни в Україні показують високу ефективність застосування БПЛА при виконанні завдань ведення спостереження, розвідки, цілевказівки, РЕБ, коригування вогню [1]. Для цього БПЛА оснащуються ультразвуковими сенсорами, радарними датчиками, лазерними локаторами і відеокамерами. В даний час такі технології оснащення БПЛА поки ще не широко застосовуються військовими підрозділами в Україні. Управління польотом БПЛА здійснюється дистанційно з наземного пункту управління по радіоканалу, або здійснюється за допомогою системи автоматичного управління (САУ). При використанні системи автоматичного управління у пам'ять бортової системи вводиться маршрут польоту, наприклад, у вигляді координат проміжних пунктів або координат цілі [2]. Зазначимо, що в даній статті розглядаються БПЛА літакового типу, що мають відповідне навігаційне та обчислювальне обладнання для реалізації автономного стабілізованого програмного розвідувального або ударного польоту. Але досвід застосування БПЛА у сучасних збройних конфліктах, зокрема російсько-українському, свідчить, що попри актуальності використання БПЛА в умовах ведення бойових дій, існує низка проблемних питань, пов'язаних з їх застосуванням. Необхідність подолання існуючих проблем є на цей час безумовно актуальною і спонукає до їх вирішення.

Забезпечення вимог до характеристик руху БПЛА літакового типу в умовах суттєвого розширення висотно-швидкісного діапазону траєкторій польоту, що тягне за собою розширення діапазону швидкісного натиску та характеристик БПЛА в цілому, що визначає нелінійність та нестаціонарність показників керованості, звуження областей стійкості та якості управління. Параметрична невизначеність БПЛА як динамічного об'єкта викликає необхідність забезпечення його сталого програмного стабілізованого руху. Таким чином, актуальною проблемою є синтез систем стабілізації сталого програмного руху БПЛА в умовах параметричної невизначеності. Звідси закон управління автономним стабілізованим програмним рухом БПЛА має дві складові, тобто

$$\underline{u}_{\text{стаб}}(t) = \underline{u}_{\text{прогр}}(t) + \underline{u}^*(t), \tag{1}$$

де $\underline{u}_{\text{прогр}}(t)$ – розрахункове програмне управління; $\underline{u}^*(t)$ – оптимальна корекція програмного управління.

Постановка проблеми. Зазвичай більша частина траєкторії розвідувального або ударного польоту БПЛА складається з поступального поздовжнього або бічного руху його центру мас. Враховуючи вищесказане, модель динаміки руху БПЛА відносно програмної траєкторії на окремих її ділянках розглядається як лінійна стаціонарна модель з невизначеністю параметрів виду:

$$\dot{\underline{x}}(t) = (A + \Lambda)\underline{x}(t) + B\underline{u}(t), \tag{2}$$

де $\underline{x}(t)$ – n-вимірний вектор відхилення руху БПЛА від програмної траєкторії; $\underline{u}(t)$– m-вимірний вектор корекції програмного управління $\underline{u}_{\text{прогр}}(t)$; A, B – матриці коефіцієнтів лінійної динамічної моделі БПЛА при сталих умовах польоту БПЛА відповідно за розмірністю ($n\times n$), ($n\times m$); Λ – невідома дійсна матрична функція невизначеності розмірності ($n\times n$).

Звідси загальна постановка задачі стабілізації програмного руху БПЛА формулюється наступним чином: Необхідно визначити оптимальне керування $\underline{u}^*(t)$, яке переводить систему (1) із заданого початкового стану $\underline{x}(t_0) = x_0$ у кінцевий стан $\underline{x}(\infty) = 0$ і мінімізує квадратичний функціонал форми:

$$I_\sigma = \int_{t_0}^{t_k} \left[\underline{x}^T(t)Q\underline{x}(t) + \underline{u}^T(t)R\underline{u}(t)\right]dt, \tag{3}$$

де $t_0 = 0, t_k = \infty$, а Q і R – позитивно визначені матриці розмірності, відповідно, ($n\times n$) and ($m\times m$).

Огляд існуючих рішень. Вирішенню цієї проблеми присвячено багато монографій, зокрема [4], і наукових статей, зокрема [5-13]. Найпоширенішим рішенням вказаної проблеми є метод H∞ оптимізації, який полягає в побудові стабілізуючого регулятора для систем зі збуреннями [5]. Регулятори, синтезовані за цим критерієм оптимальності, забезпечують стійкість замкнутої системи та мінімальну чутливість до збурень. У роботі [6] для сімейства нелінійних систем з невизначеними матрицями коефіцієнтів і вимірним вихідним зворотним зв'язком сформульовано достатні умови стійкості нульового стану із загальною квадратичною функцією Ляпунова. У роботі [7] Запропоновані методи надійного аналізу стабільності стану рівноваги та оптимізації лінійних різницевих систем з обмеженою за нормою матрицею невизначеності та статичного вимірюваного вихідного зворотного зв'язку. У роботі [8] розглянута оптимізація лінійних різницевих систем з обмеженою за нормою матрицею невизначеності та статичного вимірюваного вихідного зворотного зв'язку.

З погляду стабілізації програмного руху БПЛА, лінеаризованої моделі динаміки (2) та функціоналу якості (3), найбільший інтерес становлять роботи [10-12]. У роботі [9] запропоновано процедуру розв'язування лінійних матричних алгебраїчних рівнянь з використанням канонічного базису представлення матриць. Він поєднує в собі аналітичні властивості визначальних процедур і обчислювальну здатність алгоритму Гаусса. У роботі [10] розглянуто лінійні матричні рівняння зі специфічною структурою. На основі методу канонізації отримані формули для їх вирішення. У роботі [11] отримано аналітичні описи стабілізованих наборів збурень об’єктів на основі технології вбудовування системи та параметризації рівняння Лур’є-Ріккаті разом із виразами для відповідних регуляторів. Однак, слід зазначити, що наведені в [9-11] підходи до синтезу оптимального закону стабілізації лінійних динамічних систем з невизначеністю параметрів є досить складними для реалізації та не можуть забезпечити необхідні динамічні показники перехідних процесів лінійних динамічних систем з параметричною невизначеністю у режимах стабілізації.

Дана стаття є подальшим розвитком цих робіт. Стаття присвячена розробці методу корекції зворотних зв’язків замкненої динамічної системи з параметричною невизначеністю, яка забезпечує стабілізацію програмного руху БПЛА із заданими показниками якості перехідних процесів.

Розв'язання задачі. У наведеній постановці задача стабілізації лінійних динамічних систем з невизначеністю параметрів (в нашому випадку, БПЛА) належить до задач лінійно-квадратичної оптимізації, яка зводиться до розв’язування нелінійного алгебраїчного рівняння Ріккаті для визначення невідомих коефіцієнтів у законі оптимального керування. Цей закон є лінійною комбінацією змінних стану шуканої динамічної системи. Згідно (1) оптимальне управління системою (2) можна представити у вигляді:

$$\underline{u}(t) = -(K+k)\underline{x}(t), \qquad (4)$$

де K – матриця коефіцієнтів оптимального закону стабілізації системи (4) за відсутності матриці невизначеностей Λ; k – матриця коефіцієнтів компенсації впливу невизначеностей на параметри системи (2).

З урахуванням (2) і (4) рівняння замкнутої оптимальної системи стабілізації можемо записати у вигляді:

$$\underline{\dot{x}}(t) = [A + K]\underline{x}(t) + [\Lambda + k]\underline{x}(t). \qquad (5)$$

Нехай задані обмеження на елементи матриці параметричної невизначеності Λ пов’язані з похибкою ідентифікації, тобто

$$\left|\lambda_{ij}\right| \le \Lambda_{ij}^{0}, \qquad (6)$$

а також показники якості перехідних процесів для змінних стану у вигляді:

$$|x_i(t)| \le \sigma_i^0. \qquad (7)$$

Звідси задача стабілізації програмного руху БПЛА формулюється наступним чином: Необхідно синтезувати закон керування (4) за умов (6) та забезпечити задані показники якості перехідних процесів (7) у системі стабілізації програмного руху БПЛА з параметричною невизначеністю (5).

Пропонований в даній статті метод корекції зворотних зв’язків системи стабілізації (5) базується на концепції допустимості, яка використовує в якості оцінки первинні показники якості перехідних процесів, такі як час переходу, динамічна і статична точність та інші.

Запишемо рівняння (5) у координатному вигляді

$$|\dot{x}_i(t)| = \sum_{j=1}^{n} (a_{ij} + K_{ij} + k_{ij} + \lambda_{ij})x_j(t). \qquad (8)$$

Згідно принципу гарантованої динаміки [13] умови (6),(7) виконуються, якщо

$$\int_0^t x_i(\tau)\dot{x}_i(\tau)d\tau \le \int_0^t \sigma_i(\tau)\sigma_i(\tau)d\tau, \ i = 1,2 \dots, n; \ t \in [0, \infty]. \qquad (9)$$

Підставляючи вираз (8) у (9), отримуємо

$$\int_0^t \left[\sum_{J=1}^{n} (a_{ij} + K_{ij} + k_{ij} + \lambda_{ij}) x_j(\tau)\right] x_i(t) d\tau \le \int_0^t \sigma_i(\tau)\sigma_i(\tau) d\tau, \quad (10)$$

де $i = 1,2 \dots, n$; $t \in [0, \infty]$.

Встановимо $\sigma_i^0(t)$ як

$$\sigma_i^0(t) = \sigma_i^0 e^{\alpha t}, \quad (11)$$

де $\sigma_i^0(t)$ – оцінки максимально можливих відхилень $x_i(t)$ у початковий момент часу, а α визначається з умови заданого ступеня затуханняβ_i перехідного процесу (рис.1) і однакового для всіх змінних стану, тобто

$$e^{\alpha t_k} \le \beta_i, \quad (12)$$

де $\alpha \le 0, t_k$ – заданий час перехідних процесів.

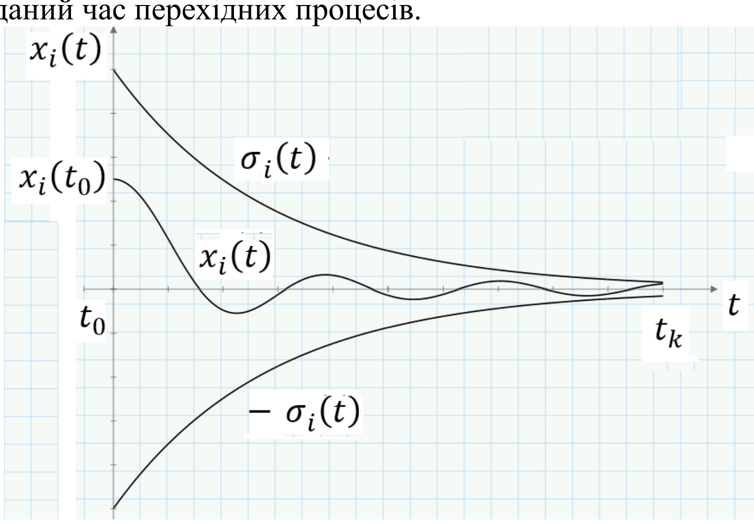

Рис. 1. Межі допустимого діапазону зміни і-го параметра

Ці динамічні показники перехідних процесів забезпечуються відповідним вибором спектра коренів замкнутої оптимальної системи згідно з роботою [3].

З урахуванням (7), (8) і (11) рівняння (10) набуває вигляду:

$$\int_0^t \left[\sum_{J=1}^{n} (a_{ij} + K_{ij} + k_{ij} + \lambda_{ij}^0)\sigma_j^0\right]\sigma_i^0 e^{2\alpha\tau} d\tau \le \int_0^t \alpha(\sigma_i^0)^2 d\tau, \quad (13)$$

де $i = 1,2 \dots, n$; $t \in [0, \infty]$.

Інтегруючи нерівність (13) на інтервалі $t \in [0, t_k]$, отримуємо систему лінійних алгебраїчних нерівностей

$$2\left[\sum_{J=1}^{n} (a_{ij} + K_{ij} + k_{ij} + \lambda_{ij}^0)\sigma_j^0\right]\sigma_i^0 e^{2\alpha\tau} \le \sigma_i^0, i = 1,2 \dots, n. \quad (14)$$

Звідси отриманий набір значень k_{ij}, які задовольняють систему нерівностей (14), забезпечує стійкість програмного руху БПЛА, тобто системи (2) до параметричних збурень на основі закону управління (4), отриманого за описаною вище процедурою. Одним із варіантів практичного визначення значень регуляторів компенсації k_{ij} є розв'язок системи нерівностей (14) на границях допустимих областей $+\alpha\sigma_i^0$ та $-\alpha\sigma_i^0$ за допомогою добре відомих чисельних методів в бортовому обчислювальному пристрої БПЛА [14].

На рис.2 наведено результати моделювання перехідних процесів в контурі стабілізації на прикладі стабілізація висоти польоту при відсутності та наявності параметричної невизначеності і різних початкових умовах лінеаризованої моделі динаміки поздовжнього руху ЛА DHC-2 «Beaver» (Канада) [15].

В цьому режимі польоту БПЛА модель описується наступним чином:

$$x_1 = h = var[\text{м}];\ x_2 = \frac{dh}{dt} = var\left[\frac{\text{м}}{\text{сек}}\right];\ x_3 = \omega_z = var\left[\frac{\text{град}}{\text{сек}}\right];$$
$$V = const[\text{м/сек}];\ \propto = 0\ [\text{град}].$$

де x_1 – висота; x_2 – швидкість зміни висоти; x_3 – кут тангажу.

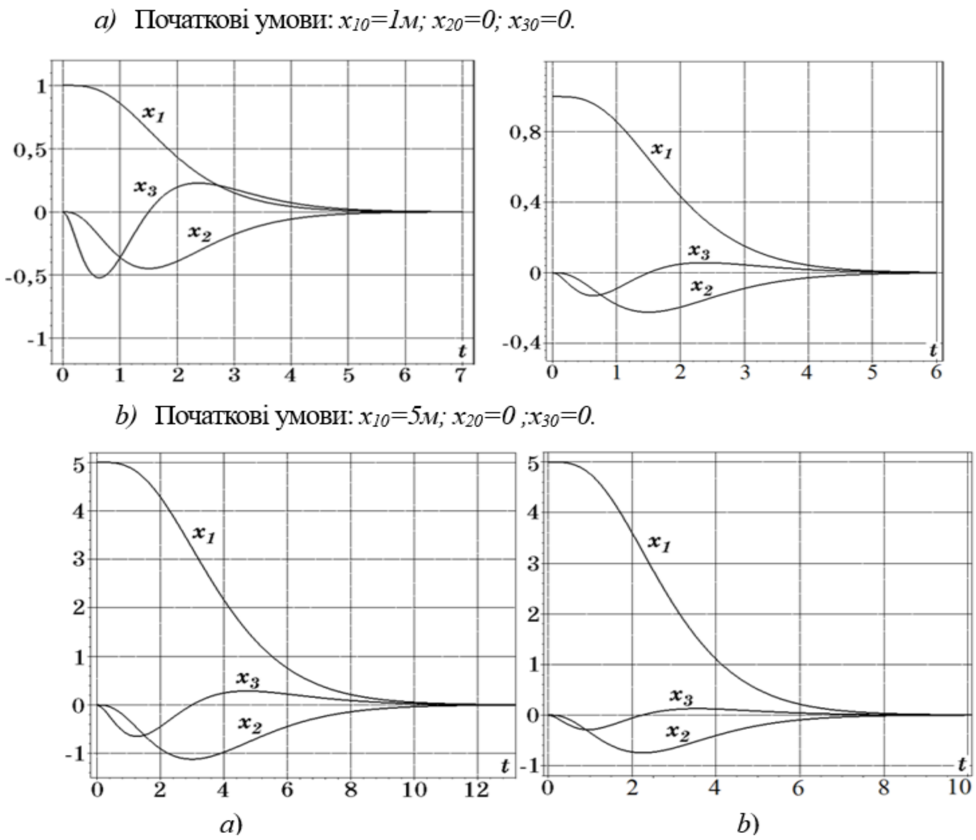

Рис.2. Графіки перехідних процесів стабілізації програмного руху БПЛА: *a*) відсутність параметричної невизначеності; *b*) наявність параметричної невизначеності

З графіків випливає, що з точки зору функціоналу (3) сумарна площина відхилення змінних БПЛА на рис.1а) менше, тобто процес краще, але з точки зору забезпечення заданих динамічних параметрів перехідних процесів стабілізації (в даному випадку, часу та ступеня згасання) вони однакові і відповідають поставленим вимогам.

Висновки. Запропоновано метод корекції зворотних зв’язків робастного регулятора стабілізації програмної траєкторії польоту БПЛА в умовах невизначеності параметрів його стану. Синтез робастного регулятора базується на концепції допустимості, яка використовує в якості оцінки первинні показники якості перехідних процесів, такі як час переходу, динамічна і статична точність та інші. Його суть полягає в тому, що при можливих допустимих варіаціях параметрів стану БПЛА перехідні процеси в системі стабілізації гарантовано залишаються в межах заданих допустимих областей. Межі цих областей задаються відповідним розташуванням коренів замкнутої оптимальної системи стабілізації та заданою допустимою похибкою ідентифікації параметрів стану БПЛА. Таким чином, синтез робастного регулятора стабілізації програмного руху БПЛА запропонованим методом корекції зворотних зв’язків можна забезпечити необхідні динамічні властивості перехідних процесів стабілізації.

Список використаних джерел:

1. Kharchenko O.V., Kuleshyn V.V., Kotsurenko Y.V. Classification and trends in the creation of unmanned aerial vehicles for military purposes / Science and Defense, no. 1, 2005. – P.57-60.

2. Miklukha,V., Khimchyk N. Optimization of the flight trajectory of an unmanned aerial vehicle / The trajectory of science, vol. 3, no. 9, 2017. – P.1009-1015. http://dx.doi.org/10.22178/pos.26-5.

3. Солдатова М.О. Автоматизація процесу стабілізації програмного руху безпілотного літального апарату (БПЛА)). – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація процесів управління. Київ, 2019. – 171с.

4. Zhou K., Doyle J. C., Glover K. Robust and optimal control. Englewood: Prentice Hall, 1996. 596 p.

5. Kwakernaak H. H∞-Optimization IFAC / Proceedings Volumes, Volume 24, Issue 8, September 1991, P. 17-27. https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)54139-7

6. Mazko A. G. Robust stability and evaluation of the quality functional for nonlinear control systems. Automation and Remote Control. Vol. 76. No. 2. 2015. P. 251–263. https://doi.org/10.1134/S0005117915020058.

7. Aliluiko, R. Ruska Robust stability and evaluation of the quality functional for linear control systems with matrix uncertainty / Scientific Journal of the Ternopil National Technical University, № 3 (99), 2020. – P.55-64. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2020.03

8. Polyak B. T., Shcherbakov P. S. Hard Problems in Linear Control Theory: Possible Approaches to Soltion. Automation and Remote Control. 2005. № 5 (66). P. 681–718. https://doi.org/10.1007/s10513-005-0115-0

9. Bukov V.N., Ryabchenko V.N., Kosyanchuk V.V., Zybin E.Yu. Solving of linear matrix equations by the canonization method / Bulletin of Kyiv University. Series: Physical and Mathematical Sciences. Issue 1. Kyiv: Publ. of Kyiv National University, 2002. – P. 19-28.

10. Bukov V.N., Ryabchenko V.N., Sel’vesyuk N.I., Solving of special matrix equations by canonization method / Bulletin of the University of Kiev, Series: Physics & Mathematics, no. 3, 2004.- P. 18-26.

11. Bukov V.N., Sel'vesyuk N.I. Analytical design of the robust controllers by parameterization of the Lur'e-Riccati equation /Automation and Remote Control, Volume 68, Issue 2, 2007. – P.214-223. DOI:10.1134/S0005117907020026

12. Omorov T. T. The principle of guaranteed dynamics in the theory of control systems. Book 1. Bishkek. 2001. – 150 p.

13. . Фельдман Л. П., Петренко А. І., Дмитрієва О. А. Чисельні методи в інформатиці. К: Видавнича група BHV, 2006. – 480 с.

14. Мельник К.В. Технологія μ-синтезу у завданнях управління польотом. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.13.12 – Системи автоматизації проектних робіт. - Національний авіаційний університет, Київ, 2009.

References

1. Kharchenko O.V., Kuleshyn V.V., Kotsurenko Y.V. Classification and trends in the creation of unmanned aerial vehicles for military purposes / Science and Defense, no. 1, 2005. – P.57-60.

2. Miklukha,V., Khimchyk N. Optimization of the flight trajectory of an unmanned aerial vehicle / The trajectory of science, vol. 3, no. 9, 2017. – P.1009-1015. http://dx.doi.org/10.22178/pos.26-5.

3. Soldatova M.O. Automation of the process of stabilization of the program movement of an unmanned aerial vehicle (UAV)). – Manuscript. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.13.07 – Automation of control processes. Kyiv, 2019. – 171 p.

4. Zhou K., Doyle J.C., Glover K. Robust and optimal control. Englewood: Prentice Hall, 1996. 596 p.

5. Kwakernaak H. H∞-Optimization IFAC / Proceedings Volumes, Volume 24, Issue 8, September 1991, P. 17-27. https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)54139-7

6. Mazko A.G. Robust stability and evaluation of the quality functional for nonlinear control systems. Automation and Remote Control. Vol. 76. No. 2. 2015. P. 251–263. https://doi.org/10.1134/S0005117915020058.

7. Aliluiko, R. Ruska Robust stability and evaluation of the quality functional for linear control systems with matrix uncertainty / Scientific Journal of the Ternopil National Technical University, No. 3 (99), 2020. – P.55-64. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2020.03

8. Polyak B. T., Shcherbakov P. S. Hard Problems in Linear Control Theory: Possible Approaches to Solution. Automation and Remote Control. 2005. No. 5 (66). P. 681–718. https://doi.org/10.1007/s10513-005-0115-0

9. Bukov V.N., Ryabchenko V.N., Kosyanchuk V.V., Zybin E.Yu. Solving of linear matrix equations by the canonization method / Bulletin of Kyiv University. Series: Physical and Mathematical Sciences. Issue 1. Kyiv: Publ. of Kyiv National University, 2002. – P. 19-28.

10. Bukov V.N., Ryabchenko V.N., Sel'vesyuk N.I., Solving special matrix equations by canonization method / Bulletin of the University of Kiev, Series: Physics & Mathematics, no. 3, 2004.- R. 18-26.

11. Bukov V.N., Sel'vesyuk N.I. Analytical design of the robust controllers by parameterization of the Lur'e-Riccati equation /Automation and Remote Control, Volume 68, Issue 2, 2007. - P.214-223. DOI:10.1134/S0005117907020026

12. Omorov T. T. The principle of guaranteed dynamics in the theory of control systems. Book 1. Bishkek. 2001. – 150 p.

13. . Feldman L. P., Petrenko A. I., Dmytrieva O. A. Numerical methods in computer science. K: BHV Publishing Group, 2006. – 480 p.

14. Melnyk K. V. Technology of μ-synthesis in flight control tasks. – Manuscript. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.13.12 – Systems of automation of design work. - National Aviation University, Kyiv, 2009.