

О. О. БИЛОБОРОДОВ**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ СКАНУВАЛЬНОЮ АНТЕННОЮ СИСТЕМОЮ**

На основі методу структурних схем синтезована система управління сканувальною антенною системою, яка являє собою частковий випадок слідкуючої системи, що на основі заданих координат регулює розузгодження між необхідними і поточними значеннями кутів азимуту і місця. Важливою особливістю сканувальних систем є постійний рух виконавчих механізмів під час виконання завдань цільового призначення. Тому нелінійності елементів навігаційної системи можуть призводити до суттєвого погіршення якості виконання завдань сканування. У роботі обґрунтовано структурну схему сканування за одним каналом, визначено її математичний опис. На першому етапі було проведено аналіз стійкості функціонально мінімальної системи. Було визначено необхідність інтегрування схеми з послідовно увімкненим регулятором швидкості пропорційно-інтегрально-диференційної дії і сигналом зворотного зв'язку, що знімається з тахометра на осі двигуна. Проведено моделювання контуру швидкості для аналізу його стійкості і здатності зберігати свої властивості при відхиленні параметрів від розрахункових значень або варіаціях налаштування параметрів регулятора. Було побудовано загальну схему сканувальної системи, до якої було введено нелінійний елемент. У якості нелінійного елемента було обрано спрощену модель волоконно-оптичного гіроскопа з областю нечутливості. З метою перевірки виконання вимог у перехідному та в установлених режимах роботи, а також для оцінки похибки системи при дії на неї реальних впливів було проведено модельний експеримент. Результати моделювання показали високу якість роботи синтезованої системи. Було досліджено похибки регулювання при відсутності нелінійного елемента, а також при його наявності при варіації значення ширини області нечутливості. Визначено, що високі значення ширини області нечутливості можуть призводити до зриву управління, що необхідно враховувати при обґрунтуванні вимог до подібних систем.

Ключові слова: автоматизована система управління, антенна система, сканування, якість управління, нелінійність параметрів, похибки.

О. А. БЕЛОБОРОДОВ**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СКАНИРУЮЩЕЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМОЙ**

На основе метода структурных схем синтезирована система управления сканирующей антенной системой, представляющая собой частный случай следящей системы, которая на основе заданных координат регулирует рассогласование между необходимыми и текущими значениями углов азимута и места. Важной особенностью сканирующих систем является постоянное движение исполнительных механизмов при выполнении задач целевого назначения. Поэтому нелинейности элементов навигационной системы могут приводить к существенному ухудшению качества выполнения задач сканирования. В статье обоснована структурная схема сканирования по одному каналу, определено ее математическое описание. На первом этапе был проведен анализ устойчивости функционально минимальной системы. Была определена необходимость интегрирования схемы с последовательно включенным регулятором скорости пропорционально-интегрально-дифференциального действия и сигналом обратной связи, снимаемого с тахометра на оси двигателя. Проведено моделирование контура скорости для анализа его устойчивости и способности сохранять свои свойства при отклонении параметров от расчетных значений и ли вариациях настройки параметров регулятора. Было построено общую схему сканирующей системы, в которую был внедрен нелинейный элемент. В качестве нелинейного элемента была выбрана упрощенная модель волоконно-оптического гироскопа с областью нечувствительности. С целью проверки выполнения требований в переходном и в установленном режимах работы, а также для оценки погрешности системы при воздействии на нее реальных воздействий был проведен модельный эксперимент. Результаты моделирования показали высокое качество работы синтезированной системы. Были исследованы погрешности регулирования при отсутствии нелинейного элемента, а также при его наличии при вариации значения ширины области нечувствительности. Определено, что высокие значения ширины области нечувствительности могут приводить к срыву управления, что необходимо учитывать при обосновании требований к подобным системам.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, антенная система, сканирование, качество управления, нелинейность параметров, ошибки.

О. О. BILOBORODOV**AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF THE SCAN ANTENNA SYSTEM**

Based on the method of structural schemes, the control system of the scanning antenna system is synthesized, which is a special case of the tracking system, which, based on the given coordinates, controls the mismatch between the necessary and current values of the azimuth and elevation angles. An important feature of scanning systems is the constant movement of actuators when performing tasks of the intended purpose. Therefore, the nonlinearity of the elements of the navigation system can lead to a significant deterioration in the quality of the scan tasks. The article substantiates the block diagram of scanning on one channel, its mathematical description is determined. At the first stage, an analysis of the stability of a functionally minimal system was carried out. The need was identified for integrating the circuit with a sequentially connected speed controller of proportional-integral-differential action and a feedback signal taken from the tachometer on the axis of the engine. The speed loop was modeled to analyze its stability and ability to maintain its properties when the parameters deviate from the calculated values or the controller parameter settings are varied. A general scheme of the scanning system was built into which a nonlinear element was introduced. As a nonlinear element, a simplified model of a fiber-optic gyroscope with a deadband was chosen. In order to verify compliance with the requirements in transitional and established operating modes, as well as to evaluate the error of the system when exposed to real effects, a model experiment was conducted. The simulation results showed the high quality of the synthesized system. The control errors were investigated in the absence of a nonlinear element, as well as in its presence with a variation in the value of the width of the deadband. It is determined that high values of the width of the dead zone can lead to a breakdown of control, which must be taken into account when substantiating the requirements for such systems.

Keywords: automated control system, antenna system, scanning, control quality, non-linearity of parameters, errors

Вступ. Дослідження різної природи часто проводяться методом спостереження визначених об'єктів. У випадку, коли технічне поле зору засобів спостереження не можуть повністю охопити об'єкт

дослідження, найпростішим шляхом виконання завдання часто виступає спосіб послідовного спостереження різних частин досліджуваного об'єкта [1]. Іншими словами здійснюється сканування певної

області, яка утримує досліджуваний об’єкт (об’єкти). Для подальшого відтворення протяжного об’єкта виникає завдання постійного регулювання (оцінювання поточного положення і подальша зміна) напрямку осі відповідного технічного засобу. Подібні завдання виникають також при впливі на об’єкт фізичними факторами (лазерним або радіочастотним випромінюванням тощо) [2]. Якщо сканувальний технічний засіб спостереження (або впливу) знаходиться на рухомій платформі, то система управління наведенням такого засобу повинна враховувати як характеристики руху, так і закон сканування.

Поширеним випадком зазначених систем є сканувальна антенна система [3], функціональна схема якої наведена на рис. 1. Вона являє собою частковий випадок слідкуючої системи, яка на основі заданих координат регулює розузгодження між необхідними і поточними значеннями кутів азимуту і місця. Значення кутових координат можуть отримуватись від різних навігаційних систем (мікромеханічних, гіроскопічних, раціонавігаційних або інших). Важливою особливістю сканувальних систем є постійний рух виконавчих механізмів під час виконання завдань цільового призначення. Тому нелінійності елементів навігаційної системи можуть призводити до суттєвого погіршення якості виконання завдань сканування і потребують дослідження.



Рис. 1. Функціональна схема сканувальної системи

Аналіз останніх досліджень. В останніх дослідженнях і публікаціях означена проблема вивчається з точки зору наведення маневрених апаратів [4]. Для детермінованого руху пропонуються алгоритми прогнозу вектору осі наведення на основі методу квантеріонів з подальшим визначенням необхідної кутової швидкості на основі вирішення кінематичного рівняння [5]. Порівняльний аналіз математичних додатків [6] свідчить про можливість ефективного урахування нелінійностей складових елементів систем управління [7].

Мета статті. Враховуючи зазначене, метою статті є здійснити синтез регуляторів сканувальної системи, моделювання і перевірка здатності системи зберігати показники якості при відхиленні від розрахункових значень параметрів, а також дослідження послаблення якості сканування від впливу нелінійностей навігаційної системи.

Побудова структурної схеми. Пристрій визначення розузгодження сканувальної системи визначає відхилення напрямку осі антенної системи від мінливого напрямку на необхідний осередок району сканування і перетворює це відхилення у сигнали управління U_θ і U_φ , пропорційні сигналам розузгодження відхилень за азимутом і за кутом місця:

$$U_\theta = K_\theta(\theta_0 - \theta), U_\varphi = K_\varphi(\varphi_0 - \varphi), \quad (1)$$

де K_θ, K_φ – коефіцієнти пропорційності.

Сигнали U_θ і U_φ поступають на виконавчі пристрої, що змінюють кутове положення антени так, щоб похибки сканування за азимутом ($\theta_0 - \theta$) і за кутом місця ($\varphi_0 - \varphi$) не перевищували заданих тактико-технічних вимог. Будемо вважати виконавчі пристрої незалежними.

Джерелом задаючого впливу виступає як недетермінований рух носія, так і детермінований закон сканування (із відповідними похибками визначення положення носія, його орієнтування, а також похибками наведення антенної системи).

Структурна схема сканування за азимутом наведена на рис. 2 (аналогічно будується схема сканування на кутом місця). Вона побудована за схемою електромашинний підсилювач – двигун постійного струму з тахометричним зворотним зв’язком.

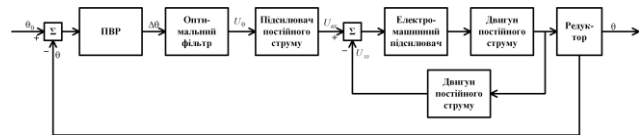


Рис. 2. Структурна схема сканувальної системи за азимутом

Математичний опис відношення змінних при їх взаємодії у системі і з зовнішнім середовищем наведений на рис. 3.

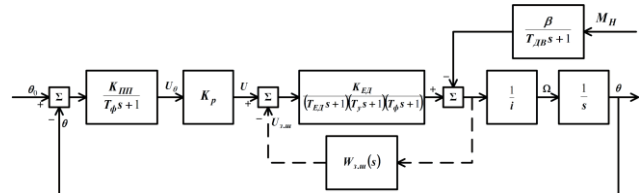


Рис. 3. Структурна схема математичної моделі сканувальної системи

Синтез системи управління сканувальної антенної системи. Для синтезу сканувальної системи скористуємося методом структурних схем.

У якості основних вимог до сканувальної системи було визначено точність (максимальне відхилення кутової координати) δ_{\max} – не більше 10 кутових хвилин, швидкість сканування Ω_{\max} – до 30 град/с, кутове прискорення ϵ_{\max} – до 0,5 рад/с². Інші дані було обрано з точки зору попереднього дослідження досяжних характеристик сучасної техніки [8; 9].

На першому етапі для визначених початкових даних було проведено аналіз стійкості функціонально мінімальної системи [10]. Тобто визначалося, чи здатна система працювати без корегуючих ланцюгів.

За результатами було визначено, що сума постійних часу значно перевищує допустиме значення, а логарифмічна амплітудна характеристика не досягала необхідного значення добротності.

З метою зниження чутливості системи до зовнішніх збурень і варіації параметрів окремих елементів, підвищення швидкодії і плавності руху для

синтезу контуру швидкості було обрано схему з послідовно увімкненим регулятором швидкості пропорційно-інтегрально-диференційної дії і сигналом зворотного зв'язку, що знімається з тахометра на осі двигуна [11].

Для забезпечення високої точності відтворення вхідних впливів при збереженні достатніх умов стійкості було синтезовано бажану передатну функцію і обчислені її параметри.

Після розрахунку параметрів контуру швидкості було проведено моделювання [12] (рис. 4) для аналізу стійкості і здатності контуру зберігати свої властивості при відхиленні параметрів від розрахункових значень або варіаціях налаштування параметрів регулятора.

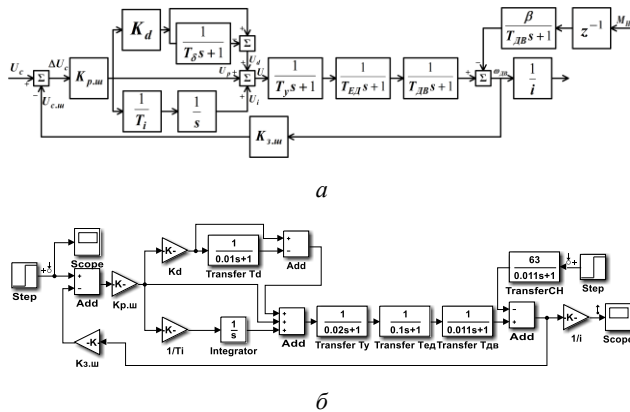


Рис. 4. Схема контуру швидкості сканувальної системи: а – математична; б – модельна

Моделювання проводилось у додатку Simulink середовища MATLAB. Для різних сполучень постійних часу (із відхиленнями до 50%) отримувались графіки реакції кутової швидкості двигуна на збурення вигляду $1(t)$ та визначалися: час установлення, час перехідного процесу і перерегулювання. За результатами аналізу отриманих даних було зроблено висновок про чутливість контуру і його стійкість.

Далі було побудовано загальну схему сканувальної системи (рис. 5), до якої було введено нелінійний елемент (з можливістю переключення для порівняльного аналізу). У якості нелінійного елемента на даному етапі досліджень було обрано спрощену модель волоконно-оптичного гіроскопа з областю нечутливості (рис. 6).

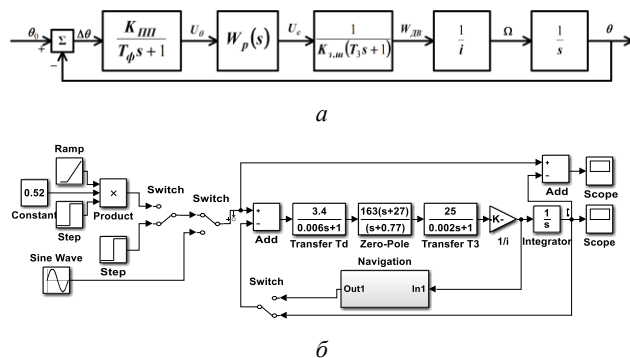


Рис. 5. Схема сканувальної системи: а – математична; б – модельна

У реальному випадку введення нелінійності означає, що об'єкт управління стає неповністю спостережним. З метою перевірки виконання вимог у перехідному та в установлених режимах роботи, а також для оцінки похибки системи при дії на неї реальних впливів було проведено модельний експеримент.

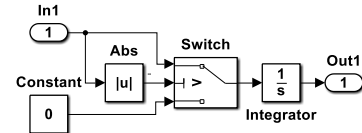


Рис. 6. Підсистема Navigation: модель датчика кутів з областю нечутливості

На першому етапі модельного експерименту було проведено лінеаризацію та досліджувалися час установлення, перерегулювання, а також час перехідного процесу. Результати моделювання показали, що показники задовольняють заданим вимогам (рис. 7, а). Дослідження стійкості здійснювалося за діаграмою Найквіста. Результати показали достатній запас стійкості синтезованої системи (рис. 7, б).

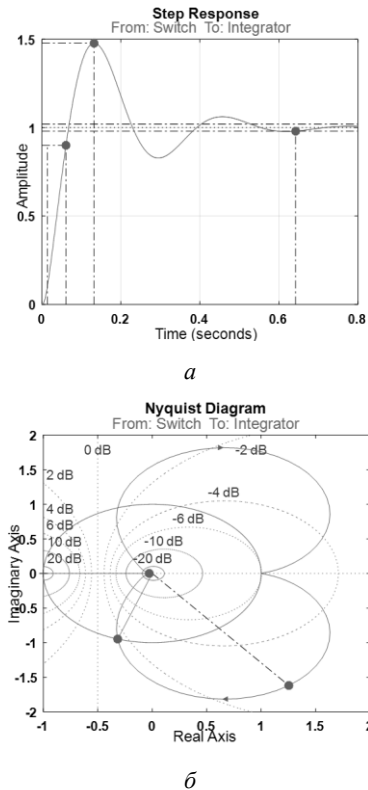


Рис. 7. Результати дослідження характеристик системи: а – перехідні характеристики; б – характеристики стійкості

Після увімкнення нелінійного елемента система не підлягає лінеаризації. Тому подальші дослідження проводились шляхом порівняння похибок системи з увімкненим та вимкненим нелінійним елементом. Розглядалися два варіанти значення ширини області нечутливості нелінійного елемента (один з варіантів у 5 разів гірший за інший).

Дослідження перехідних процесів проводилось шляхом аналізу похибок реакції на вплив вигляду $1(t)$.

Аналіз результатів (рис. 8) показав виконання заданих вимог щодо тривалості перехідних процесів та величини перерегулювання для невеликих значень ширини області нечутливості нелінійного елемента. При значних нелінійностях виявлено зрив процесу управління.

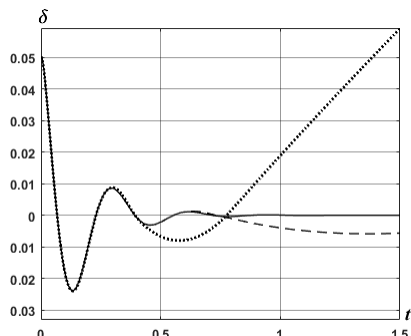


Рис. 8. Результати дослідження похибок перехідних процесів:
— без нелінійності; - - - помірна нелінійність; ···· суттєва нелінійність

Також було перевірено похибку у граничних режимах роботи при вхідному впливі на максимальній швидкості $\theta_0(t) = \Omega_{\max} t \cdot 1(t)$. Аналіз результатів (рис. 9) показав високу точність сканування та несуттєвий вплив величини нелінійності на якість процесу управління.

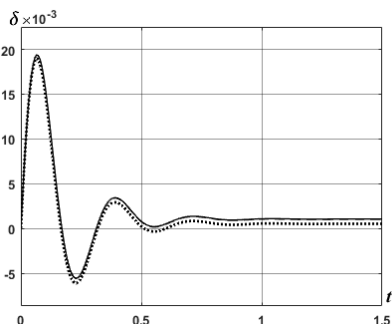


Рис. 9. Результати дослідження похибок сканування на максимальній швидкості:
— без нелінійності; - - - помірна нелінійність; ···· суттєва нелінійність

Для дослідження можливостей реальної роботи був промодельований випадок колового сканування у граничних режимах, що для одного каналу являє гармонійний вплив $\theta_0(t) = A_{\max} \sin \omega_k t$, якому відповідає максимальна швидкість $\Omega_{\max} = \omega_k A_{\max}$ і максимальне прискорення $\epsilon_{\max} = \omega_k^2 A_{\max}$. Параметри еквівалентного впливу:

$$A_{\max} = \frac{\Omega_{\max}}{\epsilon_{\max}} \text{ і } \omega_k = \frac{\epsilon_{\max}}{\Omega_{\max}}. \quad (2)$$

Аналіз результатів (рис. 9) показав придатну якість синтезованої системи управління сканувальною антенною системою, але при великих значеннях ширини області нечутливості нелінійного елемента похибки не відповідають заданим вимогам.

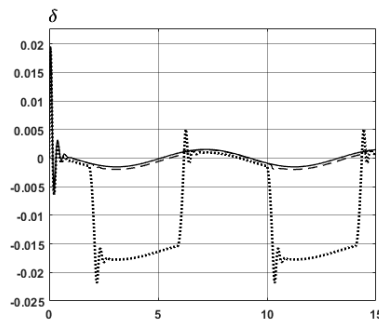


Рис. 9. Результати дослідження похибок сканування у граничних режимах:
— без нелінійності; - - - помірна нелінійність; ···· суттєва нелінійність

Висновки. Таким чином, у дослідженні синтезовано систему управління сканувальною антенною системою. Проведено програмне моделювання і здійснено перевірку здатності системи зберігати показники якості при відхиленні від розрахункових значень параметрів. Досліджено залежність якості сканування від впливу нелінійностей навігаційної системи.

Отримані результати підтверджують важливість врахування параметрів нелінійних елементів під час конструювання високоточних систем. Також слід враховувати високу вартість навігаційних систем з низькими значеннями ширини області нечутливості.

Напрямами подальших досліджень можна визначити розширення моделі нелінійностей на інші елементи, врахування інших похибок, які не розглядалися у даній статті, а також дослідження взаємного впливу каналів один на одного.

Список літератури

1. Zhang Y., Fu Y., Wang H., Li H., Pan S., Du Y. Two-dimensional environment reconstruction based on absolute local deflection angle of laser scanning data. *Оптический журнал*. 2019. № 86. С. 46–51.
2. Zhang H., Shi Y., Xu C. Y., Kutsuna M. Surface hardening of gears by laser beam processing. *Surface Engineering*. 2003. Vol. 19, no. 2. P. 134–136.
3. Кудин В. П. Сканирующая антенная система диапазона коротких волн. *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. Сер.: Естественные науки*, 2017. № 6. С. 139–144.
4. *Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов* / ред.: Красильщиков М. Н., Себряков Г. Г. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 556 с.
5. Федулов Р. В., Шишкин А. С. Наведение оптической аппаратуры малого космического аппарата дистанционного зондирования. *Вестник томского государственного университета: Математика и механика*. 2013. № 22. С. 97–104.
6. Митришкин Ю. В., Джумакаев Т. К., Корнев П. С. Имитационное моделирование систем управления плазмой в токамаке со стендом реального времени. *Труды 7-й Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика»*. Т. 2. Москва: ИПУ РАН, 2015. С. 224–229.
7. Чернов А. В., Семёнов А. В. Математическая модель следящих систем с учетом нелинейностей переменных состояния. *Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей»*. 2017. № 1, С. 88–97.
8. Шрейнер Р. Т. *Системы подчиненного регулирования электроприводов. Ч. 1. Электроприводы постоянного тока с подчиненным регулированием координат*. Екатеринбург: Изд. УГПТУ, 1997. 279 с.
9. *Электропривод: Учебное пособие* / ред.: С. В. Петухов, М. В. Кришнянис. Архангельск: С(А)ФУ, 2015. 303 с.

10. Бесекерский В. А. *Динамический синтез систем автоматического регулирования*. Москва: Наука, 1970. 576 с.
11. Семёнов А. В., Макаруч А. В. Математическая модель заданной части электромеханической следящей системы с учетом ограничений. *Мат. Всерос. науч. конф. «Теоретические и методические проблемы эффективного функционирования радиотехнических систем»*. Таганрог, 2013. С. 37–46.
12. *Автоматические системы управления в среде Matlab-Simulink: методические указания к выполнению лабораторных работ* / ред.: В. С. Щербakov, А. А. Руппель, И. В. Лазута, С. А. Милушенко. Омск: СибАДИ, 2010. 49 с.

References (transliterated)

1. Zhang Y., Fu Y., Wang H., Li H., Pan S., Du Y. Restoration of the spatial environment during two-dimensional laser scanning using data on the absolute value of the local deviation angle. *Optical magazine*. 2019, no. 86, pp. 46–51.
2. Zhang H., Shi Y., Xu C. Y., Kutsuna M. Surface hardening of gears by laser beam processing. *Surface Engineering*. 2003, vol. 19, no. 2, pp. 134–136.
3. Kudin V. P. Skanirujushhaja antennaja sistema diapazona korotkih voln [Short Range Scanning Antenna System]. *Izvestija Gomelskogo gosudarstvennogo universiteta imeni F. Skoriny. Ser.: Estestvennye nauki* [News of the Gomel State University named after F. Skorina. Series: Natural Science]. 2017, no. 6, pp. 139–144.
4. *Sovremennye informacionnye tehnologii v zadachah navigacii i navedenija bespilotnyh manevrennyh letatelnyh apparatov* [Modern information technologies in the problems of navigation and guidance of unmanned maneuverable aircraft] / editors: M. N. Krasylshchykov, G. G. Sebrjakov. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2009. 556 p.
5. Fedulov R. V., Shishkin A. S. Navedenie opticheskoy apparatury malogo kosmicheskogo apparata distancionnogo zondirovanija [Guidance of the optical equipment of a small spacecraft remote sensing]. *Vestnik tomskogo gosudarstvennogo universiteta: Matematika i mehanika* [Bulletin of Tomsk State University: Mathematics and Mechanics]. 2013, no. 22, pp. 97–104.
6. Mitrishkin J. V., Dzhumakaev T. K., Korenev P. S. Imitacionnoe modelirovanie sistem upravlenija plazmoj v tokamake so stendom realnogo vremeni [Simulation of plasma control systems in a tokamak with a real-time stand]. *Trudy 7-j Vserossijskoj nauchno-*

prakticheskoy konferencii "Imitacionnoe modelirovanie. Teorija i praktika", t. 2 [Proceedings of the 7th All-Russian Scientific and Practical Conference "Simulation. Theory and practice", vol. 2]. Moscow, IPU RAN Publ., 2015, pp. 224–229.

7. Chernov A. V., Semjonov A. V. Matematicheskaja model sledjashhih sistem s uchetom nelinejnostej peremennyh sostojanija [A mathematical model of tracking systems taking into account the nonlinearities of state variables]. *Vestnik Koncerna VKO "Almaz-Antej"* [Bulletin of the Concern "Almaz-Antey"]. 2017, no. 1, pp. 88–97.
8. Shrejner R. T. *Sistemy podchinennogo regulirovanija elektroprivodov. Ch. 1. Elektroprivody postojannogo toka s podchinennym regulirovaniem koordinat* [Systems of subordinate regulation of electric drives. Part 1. Electric drives of direct current with subordinate regulation of coordinates]. Yekaterinburg, UGPPU Publ., 1997. 279 p.
9. *Elektroprivod: Uchebnoe posobie* [Electric Drive: Tutorial] / ed. S. V. Petuhov, M. V. Krishjanis. Arhangelsk, S(A)FU Publ., 2015. 303 p.
10. Besekerskij V. A. *Dinamicheskij sintez sistem avtomaticheskogo regulirovanija* [Dynamic synthesis of automatic control systems]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 576 p.
11. Semjonov A. V., Makarchuk A. V. Matematicheskaja model zadannoj chasti elektromehaničkoj sledjashchej sistemy s uchetom ogranichenij [A mathematical model of a given part of an electromechanical tracking system, taking into account the limitations]. *Мат. Всерос. науч. конф. "Теоретические и методические проблемы эффективного функционирования радиотехнических систем"* [All-Russian Mathematical Scientific Conference "Theoretical and Methodological Problems of the Effective Functioning of Radio Engineering Systems"]. Таганрог, 2013, pp. 37–46.
12. *Автоматические системы управления в среде Matlab-Simulink: методические указания к выполнению лабораторных работ* [Automated control systems in the environment of Matlab-Simulink: guidelines for laboratory work] / ed. V. S. Shcherbakov, A. A. Ruppel, I. V. Lazuta, S. A. Miljushenko. Омск: СибАДИ Publ., 2010. 49 p.

Надійшло (received) 11.05.2020

Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Author

Білобородов Олег Олександрович – кандидат технічних наук, військова частина А4566, докторант; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3166-2659>; e-mail: 22bredly@gmail.com

Белобородов Олег Александрович – кандидат технических наук, воинская часть А4566, докторант; г. Киев, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3166-2659>; e-mail: 22bredly@gmail.com

Biloborodov Oleh Olexandrovich – Candidate of Technical Sciences, Military unit А4566, doctoral student; Kyiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3166-2659>; e-mail: 22bredly@gmail.com