

В. В. Воротніков, І. В. Зімчук, Р. В. Нетребко

АЛГОРИТМ ЦИФРОВОГО УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ АНТЕНИ НАЗЕМНОГО ПУНКТУ КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНОГО АВІАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ

З кожним роком безпілотні авіаційні комплекси знаходять усе більше застосовують як у цивільній, так і військовій сфері. Стійкий зв'язок з безпілотним літальним апаратом забезпечується високоточним наведенням антени наземного пункту керування. У режимі автоматичного супроводження безпілотного літального апарата наведення антени здійснюється системою автоматичного супроводження за напрямком. Показано, що основною вимогою, яка висувається до системи автосупроводження за напрямком, є висока динамічна точність в умовах збурень та шумів різного характеру. Традиційна система автосупроводження за напрямком не спроможна забезпечити високу точність наведення антени. Покращити якість слідкувальної системи як у перехідному, так і сталому режимах роботи запропоновано за рахунок доповнення наявної аналогової системи підсистемою цифрової корекції. Роботу присвячено синтезу алгоритму цифрового управління електроприводом антени наземної приймально-передавальної станції безпілотного авіаційного комплексу. Алгоритм цифрового управління синтезовано як результат розв'язання різницевих рівнянь, що визначаються за дискретною передавальною функцією цифрового регулятора. На практиці перевага надається простим регуляторам, розмірність яких менша за розмірність об'єкта. Спрощення структури регулятора досягнуто використанням у процесі синтезу редукованої моделі системи управління антеною. Редукацію реалізовано методом, який ґрунтується на близькості перехідних характеристик математичних моделей початкового та редукованого об'єктів управління, охоплених одиничним негативним зворотним зв'язком. Для оцінювання ступеня близькості застосовано непрямі показники якості перехідного процесу. Безпосередній синтез регулятора виконано методом на основі теорії інваріантності, він передбачає компенсацію нулів та полюсів передавальної функції об'єкта управління. Відмінною рисою використаного методу є можливість урахування вимог до стійкості та заданої динамічної точності системи управління на етапі синтезу цифрового регулятора. Наведено результати моделювання, які підтверджують працездатність та ефективність синтезованого алгоритму управління.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; система автосупроводження за напрямком; цифровий регулятор; алгоритм цифрового управління.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Останнє десятиріччя характеризується інтенсивним зростанням розробок у галузі безпілотної авіації. Безпілотні авіаційні комплекси (БпАК) знаходять широке застосування як у цивільній, так і військовій сфері [1, 2]. Незалежно від цього головними компонентами БпАК є безпілотний літальний апарат (БпЛА) та наземний пункт керування. Найважливішою характеристикою, яка визначає експлуатаційні можливості комплексу керування БпЛА, є спроможність забезпечення стійкого зв'язку.

© В. В. Воротніков, І. В. Зімчук, Р. В. Нетребко, 2019

Для забезпечення зв'язку на великій відстані та підвищення завадостійкості за рахунок просторової селекції в наземних пунктах керування широко використовують гостроспрямовані антенні системи [3]. Наведення головного максимуму діаграми спрямованості антени в задану точку простору та переміщення антени відповідно до реального руху БпЛА виконує система автосупроводження за напрямком (АСН). Більшість наявних систем АСН побудовані за принципом управління за відхиленням із використанням амплітудного пеленгатора як вимірювача кутового розузгодження та електропривода антени у складі: підсилювача потужності, виконавчого двигуна з редуктором [4, 5]. Однією з основних вимог до систем АСН є висока динамічна точність наведення антени в умовах збурень та шумів різного характеру. Оскільки основним режимом роботи системи АСН є стеження за кутовими координатами, які повільно змінюються, а аналоговому електроприводу властивий перший порядок астатизму, то традиційна система АСН не спроможна забезпечити високу точність наведення антени [5]. Покращити якість слідкувальної системи як у перехідному, так і сталому режимах роботи можливо за рахунок доповнення діючої аналогової системи підсистемою цифрової корекції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання, пов'язані із синтезом алгоритмів цифрового управління, знайшли широке відображення у вітчизняній та зарубіжній літературі [4, 6–9], де достатньо глибоко викладено принципи побудови цифрових регуляторів за різними класифікаційними ознаками. Один з відомих методів [10], що ґрунтується на теорії інваріантності, передбачає синтез досить простих алгоритмів цифрового управління, стійкість та динамічну точність яких визначають на етапі синтезу. Однак спроектовані за зазначеним методом регулятори належать до класу компенсаційних, що не дозволяє використовувати їх для управління об'єктами високого порядку [7, 8]. Проте використання в процесі синтезу редукованої моделі об'єкта управління розширює можливості даного методу [10].

Формулювання завдання дослідження. Враховуючи викладене вище, метою даної роботи є підвищення точності наведення антени наземного пункту управління БпЛА за рахунок застосування у складі системи АСН алгоритму цифрового управління, який синтезовано компенсаційним методом із використанням редукованої моделі об'єкта управління.

Постановка завдання. Задача синтезу алгоритму цифрового управління ставиться для таких умов. Пеленгаційний пристрій, який складається з антенної системи, підсилювача радіочастоти та фазового детектора, структурно описують послідовним з'єднанням елемента порівняння і фільтра нижніх частот з передавальною функцією [4]:

$$W_{nn}(p) = \frac{k_{nn}}{1 + T_{nn}p},$$

де k_{nn} , T_{nn} – коефіцієнт перетворення та постійна часу пеленгаційного пристрою;

p – оператор Лапласа.

Передавальні функції підсилювача $W_n(p)$ та двигуна $W_o(p)$ подаються в такому вигляді:

$$W_n(p) = \frac{k_n}{(1 + T_n p)},$$

$$W_o(p) = \frac{K_o}{p(1 + T_o p)},$$

де k_n , T_n – коефіцієнт перетворення та постійні часу підсилювача;

k_o , T_o – коефіцієнт перетворення та постійна часу двигуна.

Припускається, що наведення головного максимуму діаграми спрямованості антени в задану точку простору відбувається поданням на систему автосупроводження вхідної дії, яку опишемо рівнянням

$$x(t) = x_0,$$

а в разі переміщення антени відповідно до реального руху БпЛА – рівнянням

$$x(t) = x_0 + \dot{x}t,$$

де x , \dot{x} – значення кутової координати та її похідна.

Необхідно синтезувати алгоритм цифрового управління електроприводом антени, параметри якого вважаються відомими. За критерій якості візьмемо відсутність динамічної помилки наведення антени в ході автосупроводження рухомого об'єкта:

$$\varepsilon_o = x(t) - y(t) = 0,$$

де $y(t)$ – кутове положення максимуму діаграми спрямованості антени.

Виклад основного матеріалу. Для синтезу алгоритму управління використано метод, що ґрунтується на теорії інваріантності [10], відповідно до якого передавальну функцію цифрового регулятора визначаємо з такого виразу:

$$W_{up}(z) = \frac{C(z) - A(z)}{A(z)W(z)}, \quad (1)$$

де

$$A(z) = (1 - z^{-1})^{N+1}, \quad (2)$$

$$C(z) = \prod_{i=1}^{N+1} (1 + \Theta_i z^{-1}), \quad (3)$$

тут N – порядок вхідної дії;

$C(z)$ – характеристичний поліном замкненої системи, який визначає її стійкість;

$W(z)$ – дискретна передавальна функція об'єкта управління;

$A(z)$ – поліном, який визначає точність системи управління, розраховуємо з умови

$$A(z)x(z) = 0.$$

Для синтезу обчислимо передавальну функцію розімкненої системи АСН:

$$W_c(p) = \frac{k_c}{p(1 + T_m p)(1 + T_n p)(1 + T_d p)},$$

$$k_c = k_{nn} k_n k_d.$$

На практиці перевагу надають простим регуляторам, розмірність яких менша за розмірність об'єкта. Саме тому вихідна передавальна функція $W_c(p)$ підлягає максимальному спрощенню. Відомі декілька способів редукції моделей об'єктів управління, наприклад [7, 11, 12]. У роботі застосовано метод, запропонований у [13]. Його ідея полягає в тому, що для побудови редукованої моделі об'єкта управління відповідності між початковою та редукованою передавальними функціями досягають шляхом використання непрямих показників якості перехідного процесу, які визначають за частотними характеристиками. За редуковану вибирають передавальну функцію

$$W(p) = \frac{k}{p(1 + Tp)}, \quad (4)$$

якій відповідають такі амплітудно-частотна $W(\omega)$ та фазочастотна $\varphi(\omega)$ характеристики:

$$W(\omega) = \frac{k\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}{\omega(1 + \omega^2 T^2)}, \quad (5)$$

$$\varphi(\omega) = \text{arctg}\left(\frac{1}{\omega T}\right). \quad (6)$$

При цьому значення коефіцієнта підсилення k та сталої часу T розраховані на частоті зрізу ω_{zp} , яку визначено за логарифмічною амплітудно-частотною характеристикою вихідної моделі $W_c(p)$ [13].

Відповідно до (4) дискретна передавальна функція з урахуванням екстраполятора нульового порядку [4] матиме такий вигляд:

$$W(z) = \frac{c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2}}{(1 - z^{-1})(1 - d_2 z^{-1})}, \quad (7)$$

$$\text{де } c_1 = \frac{\alpha}{b^2}(bh - 1 + d_2);$$

$$c_2 = \frac{\alpha}{b^2}(1 - d_2 - bhd_2);$$

$$d_2 = e^{-bh};$$

$$\alpha = \frac{k}{T};$$

$$b = \frac{1}{T};$$

h – період дискретизації.

Для досягнення заданого показника якості системи з (2) та (3) запишемо поліноми:

$$A(z) = (1 - z^{-1})^2, \quad (8)$$

$$C(z) = (1 - Q_1 z^{-1})(1 - Q_2 z^{-1}). \quad (9)$$

Підстановкою рівнянь (7)–(9) до виразу (1) синтезуємо передавальну функцію цифрового регулятора

$$W_{up}(z) = \frac{m_0 + m_1 z^{-1} + m_2 z^{-2}}{1 + n_1 z^{-1} + n_2 z^{-2}} \quad (10)$$

та визначимо відповідний йому алгоритм цифрового управління

$$u(n) = m_0 \varepsilon(n) + m_1 \varepsilon(n-1) + m_2 \varepsilon(n-2) - n_1 u(n-1) + n_2 u(n-2), \quad (11)$$

де ε – помилка автосупроводження БПЛА;

$$m_0 = \frac{2 - Q_1 - Q_2}{c_1};$$

$$m_1 = -\frac{2d_2 - d_2 Q_1 - d_2 Q_2 - Q_1 Q_2 + 1}{c_1};$$

$$m_2 = \frac{d_2(1 - Q_1 Q_2)}{c_1};$$

$$n_1 = \frac{c_2 - c_1}{c_1};$$

$$n_2 = -\frac{c_2}{c_1}.$$

Дослідження синтезованого алгоритму управління у складі системи АСН проводилося для таких значень вихідної моделі: $k_c = 20c^{-1}$, $T_m = 0,02c$, $T_n = 0,03c$, $T_d = 0,08c$, – яким відповідає $\omega_{sp} = 15 \text{ рад/с}$ та $\varphi_c(\omega_{sp}) = -171^\circ$. З виразів (5) та (6) коефіцієнти редукованої передавальної функції набули таких значень: $k = 87c^{-1}$, $T = 0,51c$. Коефіцієнти характеристичного рівняння розраховані методом розміщення нулів та полюсів [9]. Перерегулювання $\sigma \leq 20\%$ задовольняють корені характеристичного рівняння $z_1 = 0,73$ та $z_2 = 0,75$, яким відповідають коефіцієнти $Q_1 = 0,73$ та $Q_2 = 0,75$.

Результати моделювання у вигляді перехідної характеристики за $x(n) = 1$ та графіки зміни помилки системи ε в разі лінійної вхідної дії $x(n) = nh$ наведено на рис. 1 та рис. 2.

Використання у складі замкнутої системи АСН синтезованого алгоритму цифрового управління зумовлює покращення її динамічних властивостей. Синтезований алгоритм надає системі астатизму другого порядку. У разі заданих вхідних дій у сталому режимі помилка дорівнює нулю.

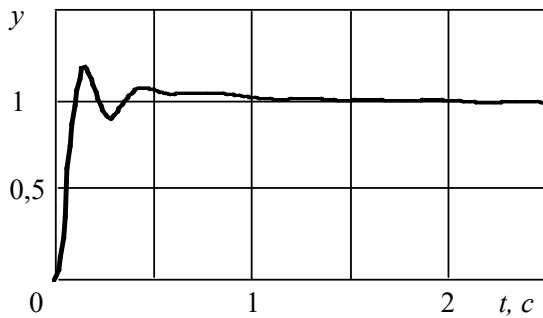


Рис. 1. Перехідна характеристика слідувальної системи

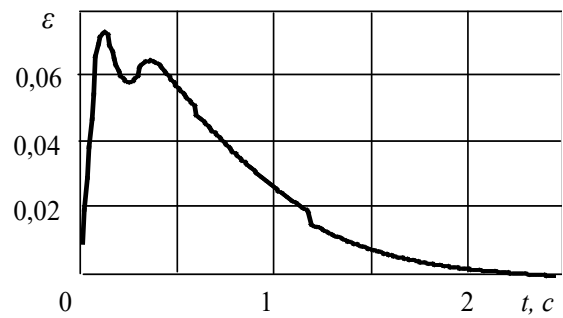


Рис. 2. Помилка слідувальної системи в разі лінійної вхідної дії

Висновки. Виходячи з викладеного вище, можна стверджувати, що застосування синтезованого алгоритму цифрового управління електроприводом антени наземного пункту керування БПЛА дає змогу підвищити точність системи АСН і, як наслідок, покращити якість виконання завдань, що ставляться перед БПАК.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Малкин В. А. Адаптивные фильтры сглаживания сигналов датчиков в системах микроавионики // Приборы и методы измерений. 2012. № 1 (4). С. 11–15.
2. Тимочко О. І., Голубничий Д. Ю., Третьяк В. Ф., Рубан І. В. Класифікація безпілотних літальних апаратів // Системи озброєння і військова техніка. 2007. Вип. 1 (9). С. 61–66.
3. Авіоніка безпілотних літальних апаратів / В. П. Харченко, В. І. Чепіженко, А. А. Тунік та ін. ; за ред. В. П. Харченка. Київ : ТОВ «Абрис-принт», 2012. 464 с.
4. Гостев В. И., Стеклов В. И., Складенко С. Н. Оптимальные системы управления с цифровыми регуляторами : справочник. Київ : КИРЦ «Сенс», 1995. 484 с.
5. Бемянский П. В., Сергеев Б. Г. Управление наземными антеннами и радиотелескопами. Москва : Сов. радио, 1980. 280 с.
6. Волгин Л. Н. Оптимальное дискретное управление динамическими системами. Москва : Наука, 1986. 239 с.
7. Изерман Р. Цифровые системы управления : пер. с англ. Москва : Мир, 1984. 541 с.
8. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления. Москва : Машиностроение, 1986. 448 с.
9. Поляков К. Ю. Основы теории цифровых систем управления : учеб. пособие. Санкт-Петербург : СПбГМТУ, 2006. 161 с.
10. Зімчук І. В., Іщенко В. І., Канкін І. О. Синтез алгоритмів цифрового управління для автоматичних слідувальних систем // Системні дослідження та інформаційні технології. 2015. № 1. С. 32–38.
11. Некоторые методы синтеза регуляторов пониженного порядка и заданной структуры / Бойченко В. А., Курдюков А. П., Тимин В. Н. и др. // Управление большими системами : сб. трудов. Москва : ИПУ РАН, 2007. Вып. 19. С. 23–126.
12. Романова И. К. Современные методы редукции нелинейных систем и их применение для формирования моделей движущихся объектов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2012. С. 122–133.

13. Зімчук І. В. Синтез цифрових регуляторів пониженого порядку для замкнених систем управління неперервними об'єктами // Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2017. № 4. С. 187–192.

Подано 30.12.2019

В. В. Воротников, И. В. Зимчук, Р. В. Нетребко

АЛГОРИТМ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ АНТЕННЫ НАЗЕМНОГО ПУНКТА УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО АВИАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА

С каждым годом беспилотные авиационные комплексы находят все большее применение как в гражданской, так и военной сфере. Устойчивая связь с беспилотным летательным аппаратом обеспечивается высокоточным наведением антенны наземного пункта управления. В режиме автоматического сопровождения беспилотного летательного аппарата наведения антенны осуществляется системой автоматического сопровождения по направлению. Показано, что основным требованием, которое выдвигается к системе автосопровождения по направлению, является высокая динамическая точность в условиях помех и шумов различного характера. Традиционная система автосопровождения по направлению не в состоянии обеспечить высокую точность наведения антенны. Улучшить качество следящей системы как в переходном, так и установившемся режимах работы предложено за счет дополнения существующей аналоговой системы подсистемой цифровой коррекции. Работа посвящена синтезу алгоритма цифрового управления электроприводом антенны наземной приемно-передающей станции беспилотного авиационного комплекса. Алгоритм цифрового управления синтезирован как результат решения разностных уравнений, определяемых по дискретной передаточной функции цифрового регулятора. На практике предпочтение отдается простым регуляторам, размерность которых меньше размерности объекта. Упрощение структуры регулятора достигнуто благодаря использованию в процессе синтеза редуцированной модели системы управления антенной. Редукция реализована методом, который основывается на близости переходных характеристик математических моделей начального и редуцированного объектов управления, охваченных единичной отрицательной обратной связью. Для оценки степени близости применены косвенные показатели качества переходного процесса. Непосредственный синтез регулятора выполнен методом на основе теории инвариантности, он предусматривает компенсацию нулей и полюсов передаточной функции объекта управления. Отличительной особенностью использованного метода является возможность учета требований к устойчивости и заданной динамической точности системы управления на этапе синтеза цифрового регулятора. Приведены результаты моделирования, подтверждающие работоспособность и эффективность синтезированного алгоритма управления.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; система автосопровождения по направлению; цифровой регулятор; алгоритм цифрового управления.

V. V. Vortnikov, I. V. Zimchuk, R. V. Netrebko

ALGORITHM FOR DIGITAL CONTROL OF THE ANTENNA OF THE GROUND CONTROL POINT OF THE UNMANNED AVIATION COMPLEX

Every year, unmanned aircraft systems are increasingly used in both the civilian and military spheres. Stable communication with an unmanned aerial vehicle is provided by high-precision pointing of the antenna of the ground control point. In the automatic tracking mode of an unmanned aerial vehicle, the antenna guidance is carried out by the automatic tracking system in the direction. It is shown that the main requirement that is put forward in the direction of the auto tracking system is high dynamic accuracy under conditions of disturbances and noises of various kinds. The traditional directional tracking system is not able to provide high precision antenna pointing. It is proposed to improve the quality of the tracking system in both transient and steady-state operating modes by supplementing the existing analog system with a digital correction subsystem. That is why the work is devoted to the synthesis of the digital control algorithm for the electric drive of the antenna of the ground receiving and transmitting station of an unmanned aircraft complex. The digital control algorithm is synthesized as a result of solving difference equations determined by the discrete transfer function of the digital controller. In practice, preference is given to simple controls, the dimension of which is less than the dimension of the object. A simplification of the controller structure was achieved by using a reduced model of the antenna control system in the synthesis process. The reduction is implemented by a method that is based on the proximity of the transition characteristics of mathematical models of initial and reduced control objects covered by a single negative feedback. To assess the degree of proximity, indirect indicators of the quality of the transition process are used. The direct synthesis of the controller is performed by a method that is based on the theory of invariance and provides for the compensation of zeros and poles of the transfer function of the control object. A distinctive feature of the method used is the ability to take into account the stability requirements and the given dynamic accuracy of the control system at the stage of synthesis of the digital controller. The simulation results confirming the efficiency and effectiveness of the synthesized control algorithm are presented.

Keywords: *unmanned aerial vehicle; directional tracking system; digital controller; digital control algorithm.*