http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-2-30-38

Оригинальная статья
Original paper

УДК 629.7.05

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ ЗАДАЧИ НАВЕДЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ВДОЛЬ ГИПЕРБОЛЫ

В.В. ЛЕГКОСТУП, В.Э. МАРКЕВИЧ, С.А. ШАБАН

ОАО «АЛЕВКУРП» (д. Королёв Стан, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 7 октября 2021

Аннотация. Целью статьи является изложение методики получения структуры оптимального регулятора, позволяющего осуществить наведение на плоскости летательного аппарата в точку цели, используя разность дальностей до двух навигационных позиций. Особенностью данной системы является то, что одна разность дальностей между летательным аппаратом и двумя навигационными позициями не позволяет полностью описать положение летательного аппарата на плоскости, а описывает фактически линию положения в виде гиперболы. Задача наведения решается выбором гиперболы, проходящей через точку цели, выводом летательного аппарата на заданную гиперболу с последующим его движением вдоль нее. Учитывая нелинейную кинематическую связь между координатами объекта управления, выраженными в эллиптической системе координат, и действующими на данный объект ускорениями, для синтеза оптимального регулятора классическими методами необходимо производить линеаризацию системы. Чтобы избежать такого упрощения, в данной работе рассмотрено применение метода синтеза агрегированного регулятора для получения нелинейного закона управления объектом. Это позволило более полно учитывать свойства объекта управления. Компьютерное моделирование показало эффективность полученных выражений.

Ключевые слова: система автоматического управления, метод аналитического конструирования агрегированного регулятора, синергетический синтез регулятора, разностно-дальномерная система, TDoA.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Легкоступ В.В., Маркевич В.Э., Шабан С.А. Методика получения закона управления с использованием синергетического подхода для задачи наведения летательного аппарата вдоль гиперболы. Доклады БГУИР. 2022; 20(2): 30-38.

METHOD OF OBTAINING A CONTROL LOW USING A SYNERGETIC APPROACH FOR THE PROBLEM OF AIRCRAFT GUIDANCE ALONG A HYPERBOLA

VICTOR V. LEGKOSTUP, VITALY E. MARKEVICH, SERGEY A. SHABAN

JSC "ALEVKURP" *(village Korolev Stan, Republic of Belarus)*

Submitted 7 October 2021

Abstract. The purpose of the article is to describe the methodology for obtaining the structure of the optimal controller, which guidances the aircraft to the target point along a hyperbola, using the Time Difference of Arrivals (TDoA) from two navigation positions on the plane. A feature of this system is that one TDoA measurement does not allow to fully describe the position of the aircraft on the plane, but only describes the position hyperbola. The guidance problem is solved by choosing a proper hyperbola passing through the target point and letting the aircraft move along this hyperbola to the target. This paper considers the application of the method of synthesis of an aggregated controller to obtain a nonlinear guidance law. This made it possible to take into account the properties of the control object to a larger extent. Computer simulation has shown the effectiveness of the expressions obtained.

Keywords: control system, synergetic synthesis of control system, aircraft, guidance, TDoA.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Legkostup V.V., Markevich V.E., Shaban S.A. Method of Obtaining a Control Low Using a Synergetic Approach for the Problem of Aircraft Guidance Along a Hyperbola. Doklady BGUIR. 2022; 20(2): 30-38.

Введение

Метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [1] является относительно новым методом синтеза систем управления. Данный метод, по-видимому, является некоторым обобщением таких направлений теории автоматического управления, как метод обратной задачи динамики, линеаризация обратной связью, стабилизация системы функцией Ляпунова и некоторых других [2–3]. Перспективность метода АКАР связана с принципиальными отличиями методики получения закона управления, основанной на естественном учете свойств целевой динамической системы независимо от присутствующих нелинейных зависимостей, а также размерности системы. При этом синтез осуществляется таким образом, что динамика управляемой динамической системы объединяется с динамикой регулятора, порождая закладываемую на этапе проектирования динамику в соответствии с определенным критерием качества. Это достигается введением в систему особых притягивающих многообразий (аттракторов), управляющих поведением системы. В противовес этому другие часто используемые методы синтеза, такие как метод аналитического конструирования оптимального регулятора, метод желаемых логарифмических амплитудно-частотных характеристик, методы модального управления, в большинстве своем используют нули и полюсы передаточных функций [4]. В свою очередь для этого необходимо производить линеаризацию исходной нелинейной системы. При этом некоторые свойства таких систем оказываются неучтенными. Более того, иногда приходится искусственно сужать область допустимого управления, чтобы удержать систему вблизи выбранной точки линеаризации, что присуще, к примеру, многим системам стабилизации движения летательных аппаратов.

Особенностью систем управления, построенных по методу АКАР, является то, что траектории движения фазовых точек полученной системы условно имеют две области поведения. Так как закон управления определяет некоторое устойчивое многообразие, введенное в соответствии с рассматриваемой методикой, к которому приближаются другие траектории системы, то при наличии управляющих или возмущающих воздействий система будет вынуждена двигаться в область данного многообразия. По достижению этого многообразия система начинает двигаться вдоль него к началу координат, удовлетворяя таким образом заданному критерию качества.

В данной работе рассмотрено применение метода АКАР для синтеза регулятора управления движением на плоскости беспилотного летательного аппарата (БЛА), наводимого на цель с помощью разностно-дальномерной навигационной системы, состоящей из двух навигационных позиций. С помощью одного такого навигационного измерения возможно оценить лишь гиперболу положения БЛА, связь которой с действующими на БЛА ускорениями имеет множество нелинейностей [5]. Смысл такого способа наведения состоит в уменьшении количества необходимых навигационных позиций, так как для получения полных координат БЛА на плоскости необходимо располагать двумя разностно-дальномерными измерениями, требующими наличия по меньшей мере трех источников навигационного сигнала для решения системы навигационных уравнений.

Методика синтеза закона управления методом АКАР

Предположим, что объект управления может быть представлен в пространстве состояний в виде системы, состоящей из n дифференциальных уравнений:

$$\left.\begin{aligned} &\dot{x}_1(t) = f_1(x_1, ..., x_n), \\ &\dot{x}_2(t) = f_2(x_1, ..., x_n), \\ &\vdots \\ &\dot{x}_n(t) = f_n(x_1, ..., x_n) + u(x_1, ..., x_n) \end{aligned}\right\}, \tag{1}$$

где $x_1, ..., x_n$ – фазовые координаты системы; $f_1(x_1, ..., x_n), ..., f_n(x_1, ..., x_n)$ – нелинейные функции, описывающие динамику соответствующих координат; $u\left(x_1, ..., x_n\right)$ – закон управления.

Введем для синтезируемой системы управления интегральный сопровождающий функционал качества вида

$$J_\Sigma = \int_0^\infty F(\psi, \dot{\psi}) dt, \tag{2}$$

где $F(\psi, \dot{\psi})$ – непрерывно дифференцируемая по своим аргументам определенно положительная функция; $\psi = \psi(x_1, ..., x_n)$ – агрегированная макропеременная, представляющая собой некоторую дифференцируемую или кусочно-непрерывную функцию фазовых координат, причем $\psi(0, ..., 0) = 0$. Данный функционал описывает желаемое многообразие ψ, вдоль которого требуется обеспечить движение управляемой системы (1). В выборе подынтегральной функции $F(\psi, \dot{\psi})$ имеется некоторый произвол, однако с целью наглядности и простоты аналитической записи функционал в (2) предлагается выбрать в виде квадратичной формы [1]:

$$F(\psi, \dot{\psi}) = m^2 \varphi^2(\psi) + c^2 \dot{\psi}^2, \tag{3}$$

где $\varphi(\psi)$ – некоторая функция от ψ, обладающая следующими свойствами: *а)* однозначности, непрерывности, дифференцируемости при любом ψ; *б)* $\varphi(0) = 0$; *в)* $\varphi(\psi) \cdot \psi > 0, \quad \forall \psi \neq 0$. Тогда функционал (2) примет вид

$$J_\Sigma = \int_0^\infty \left[m^2 \varphi^2(\psi) + c^2 \dot{\psi}^2 \right] dt. \tag{4}$$

Полная производная от макропеременной ψ определяется выражением

$$\frac{d\psi}{dt} = \sum_{k=1}^{n} \frac{\partial\psi}{\partial x_k} \dot{x}_k(t) .$$

Тогда с учетом уравнения объекта (1) получим выражение для рассматриваемой производной:

$$\frac{d\psi}{dt} = \sum_{k=1}^{n} \frac{\partial\psi}{\partial x_k} f_k(x_1, ..., x_n) + \frac{\partial\psi}{\partial x_n} u . \qquad (5)$$

Подстановка (5) в (4) дает сопровождающий функционал качества с учетом свойств объекта управления:

$$J_\Sigma = \int_0^\infty \left[m^2 \varphi^2(\psi) + c^2 \left(\sum_{k=1}^{n} \frac{\partial\psi}{\partial x_k} f_k + \frac{\partial\psi}{\partial x_n} u \right)^2 \right] dt . \qquad (6)$$

Функционал (6) можно описать как обобщенный, учитывающий свойства как объекта управления, так и его системы управления.

Задача получения требуемого управления u сводится к минимизации функционала (6). Формализуем ее с точки зрения динамики системы: требуется найти такое управление $u(x_1, ..., x_n) = u(\psi)$, которое обеспечивает движение системы из любой начальной точки в некоторой допустимой окрестности точки $\mathbf{x}(x_{10}, ..., x_{n0})$ в окрестность многообразия

$$\psi = 0 , \qquad (7)$$

являющегося инвариантным, и дальнейшее движение системы вдоль этого многообразия к началу координат $x_1 = ... = x_n = 0$. При этом на траектории (7) достигается минимум функционала (6).

Учитывая уравнение Эйлера – Лагранжа $F(\psi, \dot{\psi}) = \dfrac{\partial(\psi, \dot{\psi})}{\partial\dot{\psi}} \dot{\psi}(t)$ и функционал (3), получим уравнение экстремалей, на которых достигается минимум функционала (6) $m^2\varphi^2(\psi) = c^2\dot{\psi}^2$, или, отбрасывая неустойчивые решения [1], получим выражение

$$T_0\dot{\psi} + \varphi(\psi) = 0 , \qquad (8)$$

где $T_0 = c/m$ – постоянная времени апериодического закона движения управляемой системы в окрестность многообразия (7). Асимптотическая устойчивость (8) обеспечивается при $T_0 > 0$, что может быть подтверждено функцией Ляпунова [1] при условиях (3).

Учитывая (5) в уравнении экстремали (8), получим основное функциональное уравнение метода АКАР:

$$T_0 \frac{\partial\psi}{\partial x_n} u + T_0 \sum_{k=1}^{n} \frac{\partial\psi}{\partial x_k} f_k + \varphi(\psi) = 0 , \qquad (9)$$

где f_k – функции в правых частях уравнений (1).

Из выражения (9) выражается закон управления

$$u = -\frac{\partial\psi^{-1}}{\partial x_n} \left[\sum_{k=1}^{n} \frac{\partial\psi}{\partial x_k} f_k + \frac{1}{T_0} \varphi(\psi) \right] . \qquad (10)$$

Под воздействием управления (10) объект будет удерживаться в окрестности $\psi = 0$, и при этом вектор состояния $\mathbf{x}$ будет совершать движение к началу координат. Это движение будет уже описываться системой меньшей размерности, состоящей из $n - 1$ дифференциальных уравнений:

$$\left.\begin{aligned} &\dot{x}_{\psi 1}(t)=f_1(x_{\psi 1},...,x_{\psi n-1}),\\ &\dot{x}_{\psi 2}(t)=f_2(x_{\psi 1},...,x_{\psi n-1}),\\ &\vdots\\ &\dot{x}_{\psi n-1}(t)=f_{n-1}(x_{\psi 1},...,x_{\psi n-1}) \end{aligned}\right\}, \tag{11}$$

где символ ψ при фазовых переменных указывает на то, что системе (11) посредством закона управления «навязана» траектория движения вдоль многообразия $\psi = 0$. Система уравнений (11) может быть получена путем выражения из конечного уравнения (7) старшей координаты $x_n = f_n(x_1, ..., x_{n-1})$ и ее подстановки в первое $n-1$ уравнение (1).

Время регулирования в данной системе определяется суммой времени T_0 приближения изображающей точки к многообразию, заданному условием $\psi = 0$ и времени $T_ж$ ее движения вдоль данного многообразия к началу координат фазового пространства. Приближенно время регулирования можно оценить по формуле [1]

$$t_{рег} = (4 \div 5)\left(T_0 + T_ж\right). \tag{12}$$

Уменьшение постоянных времени в (12) приведет к увеличению требуемых управляющих воздействий, что в конечном счете при использовании в реальных системах приведет к ограничениям. В таком случае закон движения системы (8) будет иметь отличный от закладываемого на этапе проектирования характер. Оценка времени регулирования по выражения (12) будет неадекватной. Наиболее полную информацию о времени регулирования в таком случае удастся получить только посредством имитационного моделирования.

Синтез закона наведения БЛА вдоль гиперболы методом АКАР

Для синтеза методом АКАР закона управления движением БЛА вдоль проходящей через точку цели гиперболы, объект управления выберем в виде материальной точки, движущейся в плоской эллиптической системе координат. Кинематика движения точки описывается нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка [5]:

$$\ddot{\nu} = \frac{\sqrt{2}\,W_\mu}{c\sqrt{\cos h[2\mu]-\cos[2\nu]}} - \frac{2\,\dot{\mu}\,\dot{\nu}\sin h[2\mu] + \left(\dot{\nu}^2-\dot{\mu}^2\right)\sin[2\nu]}{\cos h[2\mu]-\cos[2\nu]}, \tag{13}$$

где ν – координата БЛА, соответствующая линии положения в виде гиперболы; μ – координата БЛА, соответствующая линии положения в виде эллипса; W_μ – нормальное к гиперболе положения ускорение, действующее на БЛА; c – база бистатической системы.

Описание движения БЛА с помощью материальной точки, а не твердого тела сделано для того, чтобы сфокусироваться на получении кинематической траектории метода наведения, решая при этом раздельно задачи наведения и стабилизации БЛА в процессе полета, что является распространенной практикой при синтезе систем управления летательными аппаратами [6].

Выражение (13) можно записать в пространстве состояний следующим образом:

$$\left.\begin{aligned} &\dot{\nu}_1 = \nu_2\\ &\dot{\nu}_2 = \frac{\sqrt{2}\,W_\mu}{c\sqrt{\cos h[2\mu]-\cos[2\nu_1]}} - \frac{2\,\dot{\mu}\,\nu_2\sin h[2\mu] + \left(\nu_2{}^2-\dot{\mu}^2\right)\sin[2\nu_1]}{\cos h[2\mu]-\cos[2\nu_1]} \end{aligned}\right\}, \tag{14}$$

где $\nu_1 = \nu$ – гиперболическая координата БЛА; $\nu_2 = \dot{\nu}$ – скорость ее изменения.

Синтезируем закон управления таким образом, чтобы динамика объекта управления и регулятора описывалась простейшим дифференциальным уравнением с апериодическим характером траектории изображающей точки:

$$T_ж \dot{\nu} + \nu = \nu_0, \tag{15}$$

где $T_ж$ – постоянная времени апериодического закона движения системы; ν_0 – требуемое гиперболическое положение БЛА. Выбор апериодического закона переходного процесса обусловлен его простотой, наглядностью, а также хорошо изученными свойствами.

Фактически это означает, что если удастся получить требуемый закон управления ускорением W_μ БЛА, а также не наложено никаких других ограничений, в особенности на величину располагаемых ускорений и координаты БЛА, то закон изменения его гиперболической координаты ν будет описываться выражением (15). При этом произойдет редукция исходного дифференциального уравнения второго порядка (13) до уравнения первого порядка (15) [1].

Выберем макропеременную ψ в виде

$$\psi = \dot{\nu} + k(\nu_0 - \nu), \tag{16}$$

где $k = \dfrac{1}{T_ж}$ – коэффициент усиления следящей системы; ν_0 – требуемое положение БЛА.

Дифференцируя (16) по времени получим выражение

$$\dot{\psi} = \ddot{\nu} + k(\dot{\nu}_0 - \dot{\nu}). \tag{17}$$

Используя равенства (8) (16) (17) и выбирая простейший закон $\varphi(\psi) = \psi$, получим следующее функциональное уравнение динамики макропеременной ψ:

$$T_0\left(\ddot{\nu} + \frac{1}{T_ж}(\dot{\nu}_0 - \dot{\nu})\right) + \dot{\nu} + \frac{1}{T_0}(\nu_0 - \nu) = 0. \tag{18}$$

Нетрудно заметить, что при $\psi = 0$ выражение (16) даст закон движения системы вида (15). Подставляя уравнение объекта управления (14) в (18), получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} &T_0\left[\frac{\sqrt{2}\,W_\mu}{c\sqrt{\cos h[2\mu] - \cos[2\nu]}} - \frac{2\,\dot{\mu}\,\dot{\nu}\sin h[2\mu] + \left(\dot{\nu}^2 - \dot{\mu}^2\right)\sin[2\nu]}{\cos h[2\mu] - \cos[2\nu]} + \right.\\ &\left. + \frac{1}{T_ж}(\dot{\nu}_0 - \dot{\nu})\right] + \dot{\nu} + \frac{1}{T_ж}(\nu_0 - \nu) = 0. \end{aligned} \tag{19}$$

Выражая управляющее ускорение W_μ в (19) и учитывая при этом равенство $2(\cosh^2\mu - \cos^2\nu) = \cosh 2\mu - \cos 2\nu$, получим закон управления БЛА для наведения вдоль заданной гиперболы с координатой $\nu = \nu_0$:

$$\begin{aligned} W_\mu = \frac{c}{2}&\left[\frac{\left(\dot{\nu}^2 - \dot{\mu}^2\right)\sin 2\nu + 2\dot{\mu}\dot{\nu}\sin h2\mu}{\sqrt{\cos h^2\mu - \cos^2\nu}} + \right.\\ &\left. + \sqrt{\cos h^2\mu - \cos^2\nu}\left(\frac{1}{T_0 T_ж}\left(\nu - \nu_0\right) + \frac{1}{T_ж}\left(\dot{\nu} - \dot{\nu}_0\right) - \frac{\dot{\nu}}{T_0}\right)\right]. \end{aligned} \tag{20}$$

При имеющихся ограничениях на допустимые ускорения или координаты закон движения (15) может не выполняться, однако выбором надлежащего значения параметра $T_ж$ можно найти наиболее предпочтительный закон движения БЛА. Так как объект управления и закон наведения являются нелинейными нестационарными системами, то оценка качества функционирования всей системы может быть выполнена с помощью компьютерного моделирования.

При измерении разностей дальностей $\Delta\tau$ от навигационных позиций до БЛА возможно более предпочтительно будет представить движение БЛА в альтернативных эллиптических координатах σ, τ, что позволит отказаться от использования нелинейного преобразования разностей дальностей в координату ν, являющуюся динамической переменной в выражении (13). Тогда кинематическую связь гиперболы положения материальной точки, описываемой координатой τ, и действующего на нее нормального к траектории движения БЛА ускорения W_σ в нормальной форме можно представить в виде [5]:

$$\left.\begin{aligned} &\dot{\tau}_1 = \tau_2 \\ &\dot{\tau}_2 = \frac{1}{\sigma^2-\tau^2}\left[\frac{\tau\dot{\sigma}^2\left(\tau^2-1\right)}{\sigma^2-1} - 2\sigma\dot{\sigma}\dot{\tau} + \frac{\tau\dot{\tau}^2\left(\sigma^2-1\right)}{\tau^2-1}\right] + \frac{W_\sigma}{c}\frac{\sqrt{\tau^2-1}}{\sqrt{\sigma^2-\tau^2}} \end{aligned}\right\}, \tag{21}$$

где $\tau_1 = \tau$ – гиперболическая координата БЛА; $\tau_2 = \dot{\tau}$ – скорость ее изменения; W_σ – нормальное к гиперболе положения ускорение, действующее на БЛА.

Как и в предыдущем случае, вывод закона управления будет осуществляться исходя из желаемой динамики, которую можно описать в виде дифференциального уравнения первого порядка вида

$$T_ж\dot{\tau} + \tau = \tau_0, \tag{22}$$

где $T_ж$ – постоянная времени апериодического закона движения системы; τ_0 – требуемое значение соответствующей координаты БЛА. Макропеременную ψ выберем в виде

$$\psi = \dot{\tau} + k(\tau_0 - \tau), \tag{23}$$

где k – коэффициент усиления следящей системы.

При таком выборе макропеременной на многообразии $\psi = 0$ динамика системы (23) будет соответствовать апериодическому закону (22) затухания координаты τ: $\dot{\tau} + k(\tau_0 - \tau) = 0$. Подставляя в (8) равенство (23) и производную от него по времени $\dot{\psi} = \ddot{\tau} + k\left(\dot{\tau}_0 - \dot{\tau}\right)$, используя при этом простейшую зависимость $\varphi\left(\psi\right) = \psi$, получим следующий закон динамики системы:

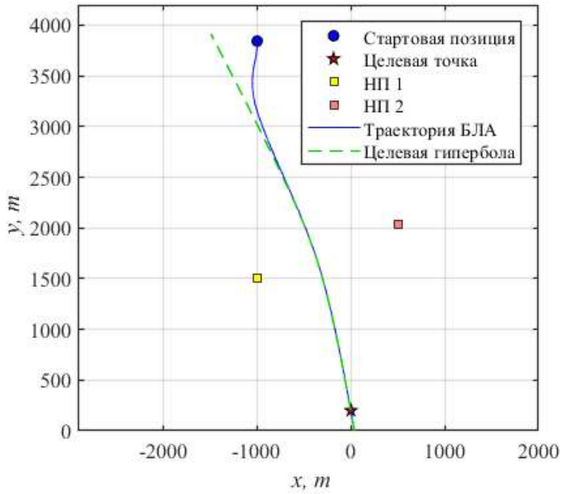
$$T_0\left(\ddot{\tau} + k(\dot{\tau}_0 - \dot{\tau})\right) + \dot{\tau} + k(\tau_0 - \tau) = 0. \tag{24}$$

Подставляя уравнения объекта управления (21) в (24), выразим потребное ускорение БЛА для движения по кинематической траектории метода наведения:

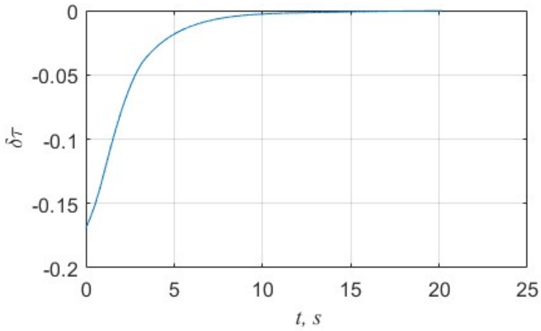
$$\begin{aligned} W_\sigma = {} & \frac{c}{\sqrt{(\tau^2-1)}\sqrt{\tau^2-\sigma^2}} \times \\ & \times\left[\frac{\tau\dot{\tau}^2(\sigma^2-1)}{\tau^2-1} + \frac{\tau\dot{\sigma}^2(\tau^2-1)}{\sigma^2-1} - 2\sigma\dot{\sigma}\dot{\tau} + (\tau^2-\sigma^2)\left(\frac{k\left(\tau_0-\tau\right)}{T_0} + k\left(\dot{\tau}_0-\dot{\tau}\right) + \frac{\dot{\tau}}{T_0}\right)\right]. \end{aligned} \tag{25}$$

На рис. 1, *a* отображена траектория движения БЛА к цели (сплошная линия) вдоль требуемой гиперболы положения (штриховая линия) в соответствии с законом управления (25), полученная по результатам компьютерного моделирования. Использовались следующие параметры: $k = 6$; $T_\psi = 2{,}5$; $\tau_0 = 0{,}17$. База c навигационной системы, образованная передающими (навигационными) позициями НП 1 и НП 2, устанавливалась равной 1000 м. Скорость движения БЛА $V = 200$ м/с, максимальные управляющие ускорения не превышали 5 *g*.

На рис. 1, *b* представлена зависимость ошибки $\delta\tau = \tau_0 - \tau$ положения БЛА на требуемой гиперболе положения от времени. Конечная ошибка наведения не превышала 1 м.



a



b

Рис 1. Результаты компьютерного моделирвоания движения БЛА, наводимого с помощью полученного закона управления: *a* – траектория движения БЛА на плоскости; *b* – зависимость ошибки слежения системы от времени

Fig. 1. Results of the computer modeling of the UAV movement according to the obtained control law: *a* – trajectory of the UAVon the plane; *b* – system tracing error dependance from time

Заключение

В работе рассмотрена методика получения закона управления нелинейным объектом, в роли которого выступала кинематическая связь, описывающая зависимость разностно-дальномерной координаты БЛА от управляющих им ускорений. Компьютерное моделирование полученного закона управления подтвердило его работоспособность.

Данный метод синтеза может быть использован для получения эталонных управлений и траекторий нелинейных многомерных систем, с которыми в последующем возможно проводить сравнение эффективности работы различных регуляторов, построенных на основе классических методов синтеза систем автоматического управления.

Список литературы

1. Колесников А.А., Гельфгат А.Г. *Проектирование многокритериальных систем управления промышленными объектами*. Москва: Энергоатомиздат; 1993.
2. Колесников А.А. Синергетическая теория управления: концепции, методы, тенденции развития. *Известия ЮФУ. Технические науки.* 2001;5.
3. Khalil H.K. *Nonlinear Systems*. New York: Macmillan; 1992 .
4. Казаков И.Е. *Статистическая теория систем управления в пространстве состояний*. Москва: Наука; 1975.
5. Легкоступ В.В., Маркевич В.В. Уравнения кинематики беспилотного летательного аппарата в эллиптической системе координат при наведении по разностно-дальномерной навигационной информации. *Системный анализ и прикладная информатика.* 2021;1:12-20.
6. Кун А.А, Лукьянов В.Ф., Шабан С.А. *Основы построения систем управления ракетами*. Минск: Издание академии; 2001

References

1. Kolesnikov A.A., Gelfgat A.G. [Design of multicriteria control systems for industrial facilities]. Moscow: Energoatomizdat; 1993. (in Russ.)
2. Kolesnikov A.A. [Synergetic management theory: concepts, development trends]. *Izvestiya SFedU. Technical science.* 2001;5. (in Russ.)
3. Khalil H.K. *Nonlinear Systems*. Macmillan, New York; 1992.
4. Kazakov I.E. [*Statistical theory of control systems in the state space*]. Moscow: Nauka; 1975. (in Russ.)

5. Legkostup V.V., Markevich V.E. [Methodology of determining of the transfer function of engagement kinematics of accelerations of an aircraft and its elliptic coordinates used for thr guidance based on time difference of arrival]. *System analysis and applied information science.* 2021;1:12-20. (in Russ.)
6. Kun A.A, Luk'yanov V.F., Shaban S.A. [*Osnovy postroyeniya sistem upravleniya raketami*]. Minsk: Izdaniye akademii; 2001. (in Russ.)

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Легкоступ В.В., научный сотрудник ОАО «АЛЕВКУРП».

Маркевич В.Э., к.т.н., заместитель директора ООО «Научно-производственное объединение САМЕРА».

Шабан С.А., к.т.н., ведущий научный сотрудник ООО «Научно-производственное объединение САМЕРА».

Information about the authors

Legkostup V.V., Researcher at JSC "ALEVKURP".

Markevich V.E., Cand. of Sci., Deputy Director of Ltd. "SAMERA".

Shaban S.A., Cand. of Sci., Leading Researcher at Ltd. "SAMERA".

Адрес для корреспонденции

223050, Республика Беларусь,
Минская обл., д. Королёв Стан,
ул. Московская, 1 а, ОАО «АЛЕВКУРП»;
тел. +375-25-532-27-25;
e-mail: legkostupvv@gmail.com
Легкоступ Виктор Валерьевич

Address for correspondence

223050, Republic of Belarus,
Minsk, v. Korolev Stan,
Moskovskaya st., 1 a, JSC "ALEVKURP";
tel. +375-25-532-27-25;
e-mail: legkostupvv@gmail.com
Legkostup Victor Valer'evich