

В. Х. Пшихопов, д-р техн. наук, проф., pshichop@rambler.ru,
М. Ю. Медведев, д-р техн. наук, проф., medvmihal@sfnu.ru,
Южный федеральный университет, г. Таганрог

Адаптивное позиционное управление подвижными объектами, не линеаризуемыми обратной связью*

Рассматривается задача управления подвижными объектами, модель которых представлена уравнениями кинематики и динамики твердого тела. Исследуются особенности управления, которые возникают, например, при выполнении летательным аппаратом сложных маневров. Задача позиционного управления решается на базе структуры адаптивных беспоскоковых систем управления с эталонной моделью. Предлагается процедура синтеза базового позиционно-траекторного регулятора. Проводится анализ асимптотической устойчивости замкнутой нелинейной эталонной системы управления методом функций Ляпунова. Предложена структура и адаптивные алгоритмы управления подвижным объектом. Адаптация полученного базового закона осуществляется на основе ПИ алгоритма. Проведен анализ устойчивости замкнутой системы. Показано, что в линейном приближении характеристическое уравнение замкнутой системы является произведением характеристического уравнения контура эталонной модели, контура управления подвижным объектом и контура адаптации. Приведены результаты численного моделирования, подтверждающие эффективность предложенного метода на примере задачи позиционирования подвижного объекта в точке при действии постоянных и переменных возмущений. Данный подход может применяться для управления динамическими нелинейными объектами с особенностями. Например, управление электрическими приводами, как правило, осуществляется при ненулевом потоке возбуждения. Данный подход позволяет устранить указанные особенности в законах управления.

Ключевые слова: позиционно-траекторное управление, адаптивное управление, подвижный объект, эталонная модель, функция Ляпунова

Введение

Задачи управления подвижными объектами в настоящее время связаны, прежде всего, с необходимостью обеспечения автономных режимов работы. Наиболее актуальными сегодня являются задачи управления движением мобильных роботов. На XII Всероссийском совещании по проблемам управления были отражены актуальные направления развития теории и систем управления мобильными роботами [1, 2]: управление в авиации и космонавтике; управление морскими подвижными объектами; мехатроника, управление и обработка информации в робототехнических системах; навигация подвижных объектов. В пленарных докладах отмечается актуальность задач, связанных с навигацией подвижных объектов, многоцелевым управлением подвижными объектами, функционирующими в различных режимах, организацией управления полетом современных космических аппаратов. Тематика секционных докладов позволяет судить о том, что в настоящее время остаются актуальными проблемы, связанные с высокоточным управлением в маневренных режимах, с расширением режимов функционирования путем применения более подроб-

ных математических моделей, с повышением автономности существующих подвижных объектов, приданием системам управления интеллектуальных свойств и согласованием различных уровней этих систем.

Большое внимание задачам планирования и управления подвижными объектами уделено на 19 Всемирном конгрессе ИФАК по управлению, прошедшем в августе 2014 г. в Кейптауне (ЮАР). Только на пленарной сессии докладов по направлению, посвященному управлению роботами и интеллектуальным системам сделано три доклада (всего восемь докладов). Более 25 % секций конгресса посвящено управлению мобильными роботами, подвижными объектами, планированию, навигации и интеллектуальным методам управления подвижными объектами. Кроме того, большое число докладов представлено по частным проблемам, отражающим особенности среды функционирования подвижных объектов.

Метод позиционно-траекторного управления [3], восходящий своими корнями к работам [4–6], в последнее время успешно применяется в автономных воздухоплавательных комплексах [7–10] и автономных средствах морского базирования [11–13]. Так, методом позиционно-траекторного управления синтезированы базовые алгоритмы прототипа высотной воздухоплавательной платформы, успешно про-

* Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации № НШ-3437.2014.10 и грантом РФФИ 13-08-00315а.

шедшей испытания в декабре 2013 г. в Чаньша (Китай). В марте 2014 г. в Таганрогском заливе успешно испытан прототип безэкипажного катера, осуществляющий автономное движение по заданным маршрутам и способный автоматически обнаруживать и обходить препятствия.

К основным теоретическим ограничениям применяемых в работах [7—13] позиционно-траекторных систем можно отнести два момента.

Во-первых, в алгоритмах позиционно-траекторного управления задается линейная модель замкнутой системы управления, т. е. исходная система линеаризуется. Отметим, что аналогичные ограничения для методов синтеза нелинейных системам встречаются довольно часто, так как при выполнении определенных условий для ряда моделей нелинейных объектов можно эффективно синтезировать управления [14]. В частности, при неособой матрице кинематики модель твердого тела является системой, линеаризуемой обратной связью.

Во-вторых, в работах [7—13] для адаптации системы управления используются наблюдатели возмущений, синтезируемые независимо от контура управления. Это приводит к необходимости повышения быстродействия наблюдателей, что, в свою очередь, повышает чувствительность системы к шумам.

В данной работе адаптация осуществляется в рамках беспойсковых адаптивных систем, основы которых заложены в ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН [15—17]. К настоящему времени данный подход доказал свою эффективность и состоятельность и продолжает развиваться [18, 19]. Так как ряд задач управления подвижными объектами (стыковка, движение в условиях препятствий) требует выполнения заданного качества управления в динамике, то в данной статье используется идеология систем с эталонными моделями [20—22], которые позволяют адаптироваться в переходных процессах.

Синтез контура управления номинальной моделью

Рассмотрим номинальную модель подвижного объекта вида [3]

$$\begin{aligned} \dot{y}_m &= R(y_m)x_m; \\ \dot{x}_m &= M^{-1}(F_{um} + F_{dm}), \end{aligned} \quad (1)$$

где y_m — вектор линейных и угловых положений номинальной модели во внешней системе координат; x_m — вектор линейных и угловых скоростей номинальной модели в связанной системе координат; $R(y_m)$ — матрица кинематики номинальной модели; F_{um} — вектор управляющих сил и моментов номинальной модели; F_{dm} — вектор прочих сил и моментов, действующих на номинальную модель; M —

матрица инерционных параметров номинальной модели; m — индекс, обозначающий переменные номинальной модели подвижного объекта.

Синтезируем для номинальной модели (1) управление, обеспечивающее стабилизацию в заданной точке. При этом замкнутую систему управления номинальной моделью (1) будем называть эталонной моделью. В соответствии с методом позиционно-траекторного управления [3] введем ошибку эталонной модели в виде

$$\Psi_{\text{эт}} = A_1 y_m + A_2, \quad (2)$$

где A_1, A_2 — диагональная матрица и вектор постоянных коэффициентов, отражающие требования к точке позиционирования.

Рассмотрим квадратичную функцию вида

$$V_{\text{эт1}} = 0,5 \Psi_{\text{эт}}^T \Psi_{\text{эт}}. \quad (3)$$

Производная по времени от выражения (3) в силу уравнений (1), (2) равна

$$\dot{V}_{\text{эт1}} = \Psi_{\text{эт}}^T \dot{\Psi}_{\text{эт}} = (A_1 y_m + A_2)^T A_1 R_m x_m. \quad (4)$$

Для того чтобы обеспечить отрицательную определенность функции (4), желаемый вид вектора x_m задается в виде

$$x_m = -Q_{\text{эт}} R_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2), \quad (5)$$

где $Q_{\text{эт}}$ — положительно определенная матрица.

Правая часть выражения (5) является желаемым изменением состояния номинальной модели (1) в течение переходного процесса. На основании (5) формируется вектор ошибок замкнутой системы управления номинальной модели в виде

$$\Psi_{V_{\text{эт}}} = x_m + Q_{\text{эт}} R_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2). \quad (6)$$

Производная по времени от выражения (6) с учетом номинальной модели (1) равна

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}_{V_{\text{эт}}} &= M^{-1}(F_{um} + F_{dm}) + Q_{\text{эт}} \dot{R}_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2) + \\ &+ Q_{\text{эт}} R_m^T A_1^T A_1 R_m x_m. \end{aligned} \quad (7)$$

Потребуем, чтобы вектор ошибок (6) подчинялся следующему эталонному дифференциальному уравнению

$$\dot{\Psi}_{V_{\text{эт}}} + T_1 \Psi_{V_{\text{эт}}} = 0, \quad (8)$$

где T_1 — положительно определенная матрица настроек регулятора.

Подставив выражения (6), (7) в уравнение (8), получим уравнение относительно вектора управле-

ния номинальной моделью F_{um} , решение которого имеет вид

$$F_{um} = -F_{dm} + M(-Q_{ЭТ} \dot{R}_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2) - Q_{ЭТ} R_m^T A_1^T A_1 R_m x_m - T_1(x_m + Q_{ЭТ} R_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2))). \quad (9)$$

Здесь предполагается, что производная по времени \dot{R}_m^T измеряется или определяется каким-либо иным способом.

Рассмотрим квадратичную функцию вида

$$V_{ЭТ2} = 0,5 \Psi_{V_{ЭТ}}^T \Psi_{V_{ЭТ}}. \quad (10)$$

Производная от выражения (10) равна

$$\begin{aligned} \dot{V}_{ЭТ2} &= \Psi_{V_{ЭТ}}^T \dot{\Psi}_{V_{ЭТ}} = \\ &= (x_m + Q_{ЭТ} R_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2))^T (M^{-1}(F_{um} + F_{dm}) + \\ &+ Q_{ЭТ} \dot{R}_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2) + Q_{ЭТ} R_m^T A_1^T A_1 R_m x_m). \end{aligned} \quad (11)$$

После подстановки (9) в выражение (11) получим

$$\begin{aligned} \dot{V}_{ЭТ2} &= -(x_m + Q_{ЭТ} R_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2))^T \times \\ &\times T_1(x_m + Q_{ЭТ} R_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2)). \end{aligned} \quad (12)$$

Так как выражение (6) не обращает систему (1), (9) в тождество, то, с учетом дополнения Барбашина—Красовского, замкнутая номинальная система является асимптотически устойчивой.

Уравнения эталонной модели (номинальной модели (1), замкнутой управлением (9)), имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{y}_m &= R(y_m) x_m; \\ \dot{x}_m &= -Q_{ЭТ} \dot{R}_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2) - Q_{ЭТ} R_m^T A_1^T A_1 R_m x_m - \\ &- T_1(x_m + Q_{ЭТ} R_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2)). \end{aligned} \quad (13)$$

Синтез контура управления моделью подвижного объекта

Рассмотрим модель подвижного объекта на базе уравнений кинематики и динамики твердого тела [2]

$$\begin{aligned} \dot{y} &= R(y)x; \\ \dot{x} &= M^{-1}(F_u + F_d), \end{aligned} \quad (14)$$

где y — вектор линейных и угловых положений подвижного объекта во внешней системе координат; x — вектор линейных и угловых скоростей подвижного объекта в связанной системе координат; $R(y)$ — матрица кинематики; M — матрица инерционных параметров; F_u — вектор управляющих сил и моментов; F_d — вектор прочих сил и моментов, действующих на подвижный объект.

Матрица $R(y)$ и вектор F_d совпадают по структуре с матрицей $R(y_m)$ и вектором F_{dm} и имеют тот же смысл соответственно.

По аналогии с выражением (6) сформируем цель управления для подвижного объекта в виде

$$\Psi_V = x + QR^T A_1^T (A_1 y + A_2). \quad (15)$$

Дополним модель подвижного объекта (15) интегратором:

$$\dot{z} = \Psi_V - \Psi_{V_{ЭТ}}. \quad (16)$$

Введем ошибку позиционно-траекторного контура управления в следующем виде:

$$\begin{aligned} e &= x + QR^T A_1^T (A_1 y + A_2) - x_m - \\ &- Q_{ЭТ} R_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2) + Bz, \end{aligned} \quad (17)$$

где B — матрица коэффициентов настройки регуляторов.

Потребуем, чтобы ошибка управления (17) удовлетворяла следующему эталонному уравнению:

$$\dot{e} + T_1 e = 0. \quad (18)$$

Производная по времени от выражения (18) в силу уравнений (1), (13)—(15) равна

$$\begin{aligned} \dot{e} &= M^{-1}(F_u + F_d) + Q \dot{R}^T(y) A_1^T (A_1 y + A_2) + \\ &+ QR^T(y) A_1^T A_1 R x - \dot{x}_m - Q_{ЭТ} \dot{R}_m^T(y) A_1^T (A_1 y_m + A_2) - \\ &- Q_{ЭТ} R_m^T(y) A_1^T A_1 R_m x_m + B(\Psi_V - \Psi_{V_{ЭТ}}). \end{aligned} \quad (19)$$

Подставив выражения (17), (19) в уравнение (18), получим уравнение, решив которое относительно вектора F_u , найдем управление

$$\begin{aligned} F_u &= -F_d + M\{-Q \dot{R}^T(y) A_1^T (A_1 y + A_2) - \\ &- QR^T(y) A_1^T A_1 R x + \dot{x}_m + Q_{ЭТ} \dot{R}_m^T(y) A_1^T (A_1 y_m + A_2) + \\ &+ Q_{ЭТ} R_m^T(y) A_1^T A_1 R_m x_m - B(\Psi_V - \Psi_{V_{ЭТ}}) - T_1 e\}. \end{aligned} \quad (20)$$

Рассмотрим теперь квадратичную функцию вида

$$V = 0,5 e^T e. \quad (21)$$

Производная по времени от функции (21) с учетом уравнений (1), (13)—(15), (19), (20) равна

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e^T \dot{e} = -\{x + QR^T A_1^T (A_1 y + A_2) - x_m - \\ &- Q_{ЭТ} R_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2) + Bz\}^T T_1 \{x + QR^T A_1^T (A_1 y + \\ &+ A_2) - x_m - Q_{ЭТ} R_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2) + Bz\}. \end{aligned} \quad (22)$$

Таким образом, с учетом дополнения Барбашина—Красовского замкнутая система управления (1), (9), (13)—(15), (20) является асимптотически устойчивой по Ляпунову.

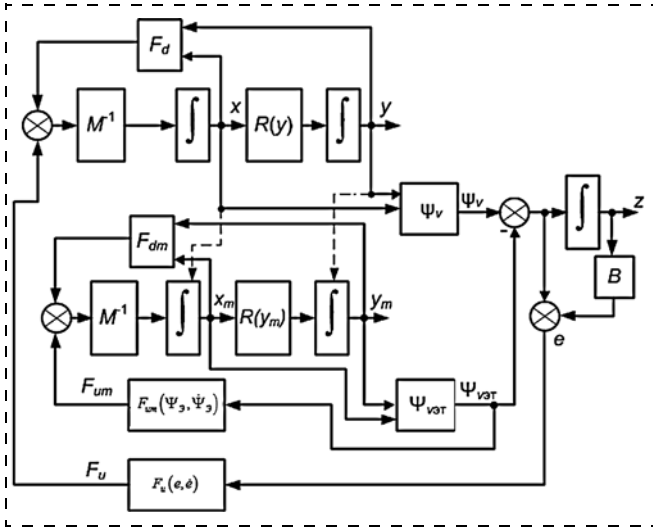


Рис. 1. Структура адаптивной позиционно-траекторной системы

При этом в алгоритме управления (9), (20) отсутствует операция обращения матриц кинематики $R(y)$ и $R(y_m)$, т. е. указанный алгоритм управления может применяться при произвольных углах тангажа подвижного объекта.

Структура адаптивной позиционно-траекторной системы управления (1), (9), (13)—(15), (20) представлена на рис. 1.

Из структуры, представленной на рис. 1, видно, что эталонная модель генерирует номинальную траекторию управляемого подвижного объекта, которая обрабатывается позиционно-траекторным регулятором как следящей системой. Адаптация осуществляется за счет интегральной составляющей. Отметим, что в данной структуре не корректируется поведение эталонной модели, полагается, что требования к траектории подвижного объекта заданы жестко.

В структуре системы контуры эталонной модели, адаптации и управления подвижным объектом соединены каскадно. Это позволяет изменять настройки каждого из перечисленных контуров независимо друг от друга. Это можно показать, проведя анализ замкнутой системы при медленно изменяющихся углах ориентации подвижного объекта. В этом случае матрицы кинематики $R(y)$ и $R(y_m)$ можно принять постоянными, и уравнения замкнутой системы относительно нулевого положения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 \dot{y} &= Rx; \\
 \dot{x} &= -(B + T_1)QR^T A_1^T A_1 y - (B + T_1 + QR^T A_1^T A_1 R)x - \\
 &\quad - T_1 Bz + BQ_{\text{ЭТ}} R_m^T A_1^T A_1 y_m + Bx_m; \\
 \dot{z} &= QR^T A_1^T A_1 y + x - Q_{\text{ЭТ}} R_m^T A_1^T A_1 y_m - x_m; \\
 \dot{y}_m &= R(y_m)x_m; \\
 \dot{x}_m &= -T_1 Q_{\text{ЭТ}} R_m^T A_1^T A_1 y_m - (T_1 + Q_{\text{ЭТ}} R_m^T A_1^T A_1 R_m)x_m.
 \end{aligned} \tag{23}$$

Характеристическое уравнение системы (23) имеет вид

$$\begin{aligned}
 D(s) &= (s^3 + (T_1 + B + QR^T A_1^T A_1 R)s^2 + \\
 &\quad + (T_1 B + (T_1 + B)QR^T A_1^T A_1 R)s + \\
 &\quad + T_1 BQR^T A_1^T A_1 R)(s^2 + (T_1 + Q_{\text{ЭТ}} R_m^T A_1^T A_1 R_m)s + \\
 &\quad + T_1 + Q_{\text{ЭТ}} R_m^T A_1^T A_1 R_m) = (s + T_1)(s + QR^T A_1^T A_1 R) \times \\
 &\quad \times (s + B)(s + T_1)(s + Q_{\text{ЭТ}} R_m^T A_1^T A_1 R_m).
 \end{aligned} \tag{24}$$

Таким образом, характеристическое уравнение (24) является произведением уравнений контура эталонной модели, контура адаптации и контура управления подвижным объектом. При этом часть корней характеристического уравнения зависит от матриц $R(y)$ и $R(y_m)$, что обусловлено отсутствием процедуры линеаризации обратной связью.

Результаты моделирования

На рис. 2 представлены результаты моделирования синтезированной адаптивной системы управления (1), (9), (13)—(15), (20).

Моделирование проводили для следующих параметров и матриц объекта управления и регулятора:

$$R = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A_{\omega} \end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\vartheta & -\cos\psi\sin\vartheta\cos\gamma + \cos\psi\sin\vartheta\sin\gamma + \sin\psi\sin\gamma & \sin\psi\cos\gamma \\ \sin\vartheta & \cos\vartheta\cos\gamma & -\cos\vartheta\sin\gamma \\ -\sin\psi\cos\vartheta & \cos\psi\sin\gamma + \sin\psi\sin\vartheta\cos\gamma & \cos\psi\cos\gamma - \sin\psi\sin\vartheta\sin\gamma \end{bmatrix};$$

$$\Delta F_d = \begin{bmatrix} 18\cos(0,8t) \\ 10 + 15\sin t \\ 25\sin(1,3t) \\ 0 \\ 30\sin t \\ 0 \end{bmatrix}; A_{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\cos\gamma}{\cos\vartheta} & -\frac{\sin\gamma}{\cos\vartheta} \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma \\ 1 & -\text{tg}\vartheta\cos\gamma & \text{tg}\vartheta\sin\gamma \end{bmatrix};$$

$$M = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100 \end{bmatrix}; F_d^0 = F_{dm} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; A_2 = \begin{bmatrix} -10 \\ -10 \\ -10 \\ 0 \\ 1,57 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$T_1 = I, Q_{\text{ЭТ}} = Q = I, A_1 = I, B = 10I,$$

где I — единичная матрица размерностью 6×6 .

На рис. 3 представлены графики изменения угла тангажа, из которых видно, что система осуществляет позиционирование подвижного объекта при угле тангажа 1,57 рад. При этом по каналу тангажа действует возмущение.

Отметим, что на графиках переменных, представленных на рис. 2, хорошо видны колебания, обусловленные гармоническими возмущениями. Однако эти колебания могут быть сделаны достаточно малыми за счет увеличения значений коэффициентов матрицы B , что легко увидеть, записав передаточную замкнутой системы функцию по возмущению:

$$W_f(s) = \frac{y(s)}{\Delta F_d(s)} = \frac{RM^{-1}s}{(s + T_1)(s + QR^T A_1^T A_1 R)(s + B)} \quad (25)$$

Подавление возмущения осуществляется за счет матрицы B , так как матрицы T_1 , Q определяют желаемое изменение координат и могут изменяться только верхним уровнем управления.

Заключение

В данной работе решается задача адаптивного позиционирования подвижных объектов при наличии неизмеряемых возмущений. Для решения задачи применяется адаптивная система, базовый закон управления которой синтезируется на основе метода позиционно-траекторного управления, а адаптация осуществляется в рамках структуры беспоисковых систем с эталонными моделями. Предложенный алгоритм адаптивного управления отличается пропорционально-интегральным алгоритмом слежения за сигналом эталонной модели и процедурой синтеза базового регулятора, позволяющей не обращать матрицу кинематики подвижного объекта. Обратная связь для эталонной модели в синтезированной адаптивной системе (см. рис. 1) обеспечивает коррекцию начальных условий эталонной модели на основе показаний датчиков. Указанная коррекция может осуществ-

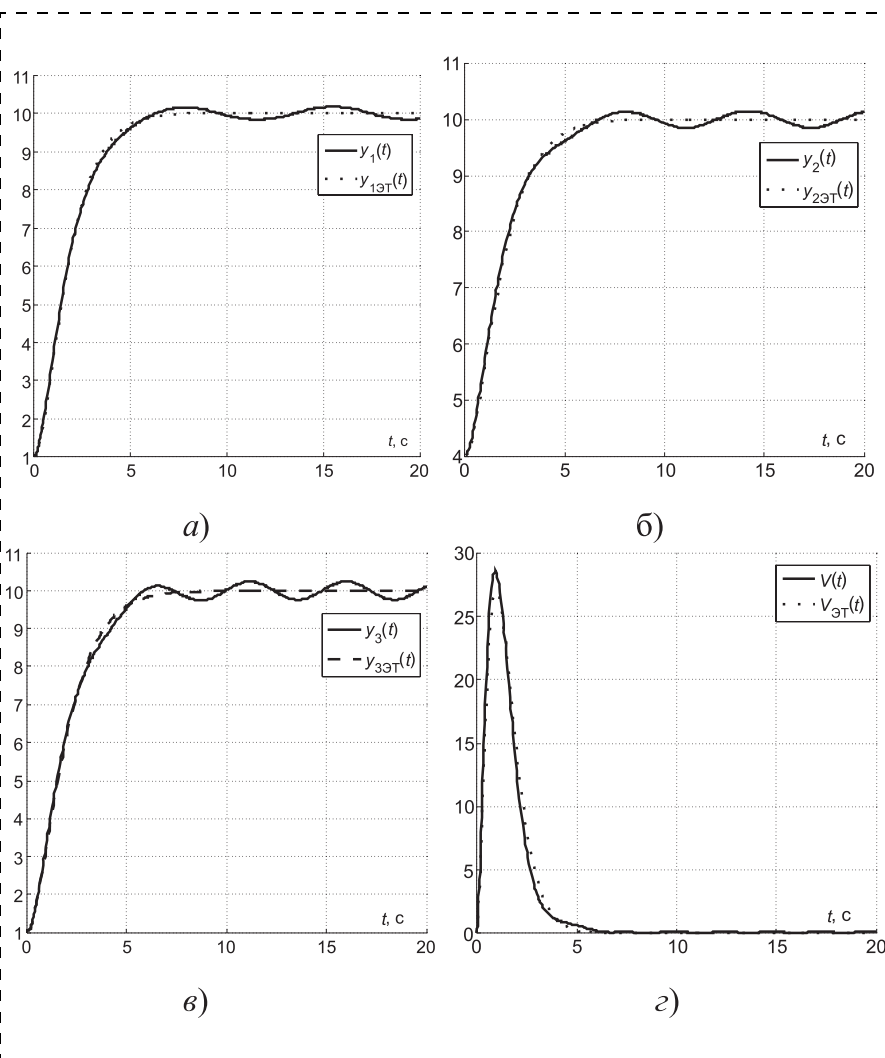


Рис. 2. Результаты моделирования адаптивной системы:

а — переменная y_1 ; б — переменная y_2 ; в — переменная y_3 ; г — квадрат скорости ПО

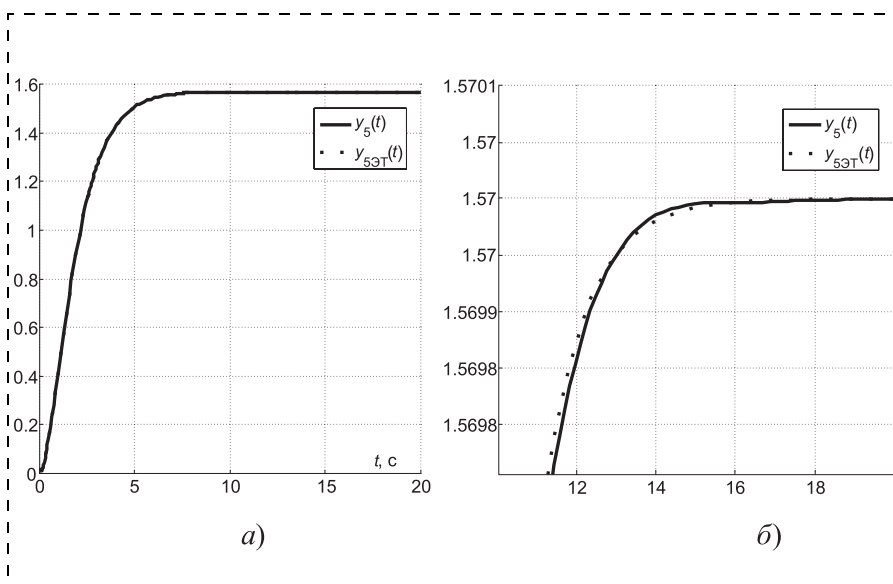


Рис. 3. Изменение угла тангажа подвижного объекта:

а — угол тангажа y_5 ; б — фрагмент графика угла тангажа

ляться только в начальный момент времени или непрерывно. Например, при движении в среде с препятствиями или при выполнении стыковки желаемая траектория подвижного объекта задается достаточно жестко. В этом случае при появлении отклонения система должна обеспечивать возвращение подвижного объекта на заданную траекторию. Здесь система представляет собой генератор желаемой траектории и следящую подсистему с ПИ адаптацией. Если же отклонение от траектории допускается (например, при движении вдали от препятствий), то при появлении отклонения можно строить эталонную траекторию из текущей точки. В этом случае коррекция начальных условий эталонной модели проводится непрерывно, и замкнутая система принципиально отличается от следящей системы.

Проведенный анализ показал, что синтезированная замкнутая система асимптотически устойчива по Ляпунову, допускает, в отличие от работ [8, 12, 23], отдельную настройку контура эталонной модели, контура адаптации и базового контура управления подвижным объектом.

Список литературы

1. Черноусько Ф. Л., Болотник Н. Н., Градецкий В. Г. Мобильные роботы: проблемы управления и оптимизации движений // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления. ВСПУ-2014. Москва, ИПУ РАН. 2014.
2. XII Всероссийское совещание по проблемам управления: аналитический обзор. URL: <http://vspu2014.ipu.ru/taxonomy/term/101>
3. Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю. Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. М.: Наука, 2011. 350 с.
4. Еругин Н. П. Построение всего множества систем дифференциальных уравнений, имеющих заданную интегральную кривую // Прикладная математика и механика. 1952. Вып. 6. С. 659—670.
5. Бойчук Л. М. Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. М.: Энергия, 1971. 112 с.
6. Галиуллин А. С. Методы решения обратных задач динамики. М.: Наука, 1986. 224 с.
7. Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю., Гайдук А. Р., Нейдорф Р. А., Беляев В. Е., Федоренко Р. В., Костюков В. А., Крухмалев В. А. Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: математическая модель // Мехатроника, автоматизация и управление. 2013. № 6. С. 14—21.
8. Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю., Гайдук А. Р., Нейдорф Р. А., Беляев В. Е., Федоренко Р. В., Костюков В. А., Крухмалев В. А. Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: алгоритмы управления // Мехатроника, автоматизация и управление. 2013. № 7. С. 13—20.
9. Pshikhopov V. Kh., Medvedev M., Gaiduk A., Belyaev V., Fedorenko R., Krukhmalev V. // Position-trajectory control system for robot on base of airship. 2013 Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. 2013. P. 3590—3595.

10. Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Yu., Gaiduk A. R., Fedorenko R. V., Krukhmalev V. A., Gurenko B. V. Position-Trajectory Control System for Unmanned Robotic Airship. Preprints of the 19th World Congress the International Federation of Automatic Control. Cape Town, South Africa. August 24—29, 2014. P. 8953—8958.

11. Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Y., and Gurenko B. V. Homing and Docking Autopilot Design for Autonomous Underwater Vehicle // Applied Mechanics and Materials Vols. 490—491 (2014). P. 700—707. Trans Tech Publications, Switzerland. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.490-491.700.

12. Пшихопов В. Х., Федотов А. А., Медведев М. Ю., Медведева Т. Н., Гуренко Б. В. Позиционно-траекторная система прямого адаптивного управления морскими подвижными объектами // Инженерный вестник Дона. 2014. № 3.

13. Пшихопов В. Х., Суконкин С. Я., Нагучев Д. Ш., Стракович В. В., Медведев М. Ю., Гуренко Б. В., Костюков В. А., Волощенко Ю. П. Автономный подводный аппарат "Скат" для решения задач поиска и обнаружения затонувших объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 3 (104). С. 153—162.

14. Гайдук А. Р. Синтез нелинейных систем на основе управляемой формы Жордана // Автоматика и телемеханика. 2006. № 7. С. 3—13.

15. Рутковский В. Ю., Крутова И. Н. Принцип построения и некоторые вопросы теории одного класса самонастраивающихся систем с моделью // Самонастраивающиеся автоматические системы: Труды I Всесоюзной конференции по теории и практике самонастраивающихся систем (10—14 декабря 1963). 1965. С. 46—63.

16. Рутковский В. Ю., Ссорин-Чайков В. Н. Самонастраивающиеся системы с пробным сигналом // Самонастраивающиеся автоматические системы: Труды I Всесоюзной конференции по теории и практике самонастраивающихся систем (10—14 декабря 1963). 1965. С. 93—111.

17. Zemlyakov S. D. Some problem of analytical synthesis in model reference control systems by the direct method of Lyapunov. Theory of self adaptive control system // Proc. of International Symposium, England, Teddington, 1965. New-York: P. N. Hummon Plenum Press, 1966. P. 175—179.

18. Рутковский В. Ю. Работы института проблем управления в области беспоисковых адаптивных систем и систем управления космическими аппаратами // Автоматика и телемеханика. 1999. № 6. С. 42—49.

19. Земляков С. Д., Рутковский В. Ю. О некоторых результатах развития теории и практики применения беспоисковых адаптивных систем // Автоматика и телемеханика. 2001. № 7. С. 103—121.

20. Рутковский В. Ю., Глузов В. М., Суханов В. М. Физически реализуемый алгоритм адаптивного управления с эталонной моделью // Автоматика и телемеханика. 2011. № 8. С. 96—108.

21. Земляков С. Д., Рутковский В. Ю. Алгоритм функционирования адаптивной системы с эталонной моделью, гарантирующий заданную динамическую точность управления нестационарным динамическим объектом в условиях неопределенности // Автоматика и телемеханика. 2009. № 10. С. 35—44

22. Глузов В. М., Земляков С. Д., Рутковский В. Ю., Суханов В. М. Применение принципа построения адаптивных систем с эталонной моделью к задачам мониторинга текущего состояния трансмиссионных валов // Автоматика и телемеханика. 2003. № 5. С. 131—146.

23. Медведев М. Ю. Алгоритмы адаптивного управления исполнительными приводами // Мехатроника, автоматизация и управление. 2006. № 6. С. 17—22.

Adaptive Position-Path Control of Vehicles without a Feedback Linearization

V. Kh. Pshikhopov, pshichop@rambler.ru, M. Yu. Medvedev, medvmihal@sfnu.ru ✉,
Southern Federal University, Taganrog, 347928, Russian Federation

Corresponding author: Medvedev Mikhail Yu., D. Sc., Professor,
Southern Federal University, Taganrog, 347928, Russian Federation,
e-mail: medvmihal@sfnu.ru

Received on December 12, 2014

Accepted January 14, 2015

The topic of the article is the mobile objects' control, a model of which is presented by the equations of kinematics and dynamics of rigid bodies and the specific features of control for maneuvers requiring pitch angles of 90 degrees or over. Such tasks may involve specific problems, which do not allow us to present the desired dynamics of the closed-loop system in the form of a linear equation, that is, the system cannot be linearized by a feedback. The problem is solved due to application of the adaptive control systems with a reference model. In the article a procedure is proposed for a synthesis of a basic position-trajectory control. Basic control for a reference model was designed on the base of the method of Lyapunov functions. Adaptation of the basic control is carried out by the proportional and integral algorithms. The article presents a block-diagram of the closed-loop system and proves the stability of the adaptive control system. It shows that in a linear approximation, a characteristic equation of the closed-loop system is a product of a characteristic equation of the reference model, the mobile object, and the adaptation subsystem. The authors also present the modeling results. The proposed approach can also be used for different nonlinear systems with peculiarities. For example, in the electrical drives the field control voltage ensures a nonzero nominal flux at the first stage. Then, the supply control voltage ensures a nominal shaft rotation speed or torque. This approach allows us to control the shaft rotation speed with a zero field control voltage.

Keywords: position-path control, adaptive control, mobile object, reference model, function of Lyapunov

Acknowledgements: This work was supported by grant No. H11-3437.2014.10 of the President of the Russian Federation and by a grant from the Russian Foundation for Basic Research, project No. 13-08-00315a.

For citation:

Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Yu. Adaptive Position-Path Control of Vehicles without a Feedback Linearization, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 8, pp. 523–530.

DOI: 10.17587/mau.16.523-530

References

1. Chernous'ko F. L., Bolotnik N. N., Gradeckij V. G. *Mobil'nye roboty: problemy upravleniya i optimizatsii dvizhenij* (Mobile robots: problems of control and movement optimization), In *Proc. of XII Russian conference on control problems. VSPU-2014*, Moscow, Institute of Control Problems RAS, 2014 (in Russian).
2. *XII Vserossijskoe soveshchanie po problemam upravleniya: analiticheskij obzor* (XII Russian conference on control problems: analytical review), available at: <http://vspu2014.ipu.ru/taxonomy/term/101>
3. Pshikhopov V. H., Medvedev M. Ju. *Upravlenie podvizhnymi ob'ektami v opredelennyh i neopredelennyh sredah* (Control of vehicles in certain and uncertain environments), Moscow, Nauka, 2011, 350 p. (in Russian).
4. Erugin N. P. *Postroenie vsego mnozhestva sistem differentsial'nyh uravnenij, imeju-shih zadannuju integral'nuju krivuju* (Construction of the entire set of differential equations systems with given integral curve), *Prikladnaja Matematika i Mehanika*, 1952, iss. 6, pp. 659–670 (in Russian).
5. Bojchuk L. M. *Metod strukturnogo sinteza nelinejnyh sistem avtomaticheskogo upravleniya* (Method of structure design of nonlinear automatic control systems), Moscow, Jenergija, 1971, 112 p. (in Russian).
6. Galiullin A. S. *Metody reshenija obratnyh zadach dinamiki* (Solution methods of inverse dynamics problems), Moscow, Nauka, 1986, 224 p. (in Russian).
7. Pshikhopov V. H., Medvedev M. Ju., Gajduk A. R., Nejdorf R. A., Beljaev V. E., Fedorenko R. V., Kostjukov V. A., Kruhmalev V. A. *Sistema pozicionno-traektorного upravlenija robotizirovannoj vozduhoplavitel'noj platformoj: matematicheskaja model'* (Position-trajectory control system for robot on base of airship: mathematical model), *Mekhatronika, Avtomatizatsija, Upravlenie*, 2013, no. 6, pp. 14–21 (in Russian).
8. Pshikhopov V. H., Medvedev M. Ju., Gajduk A. R., Nejdorf R. A., Beljaev V. E., Fedorenko R. V., Kostjukov V. A., Kruhmalev V. A.

Sistema pozicionno-traektorного upravlenija robotizirovannoj vozduhoplavitel'noj platformoj: algoritmy upravlenija (Position-trajectory control system for robot on base of airship: control algorithms), *Mekhatronika, Avtomatizatsija, Upravlenie*, 2013, no. 7, pp. 13–20 (in Russian).

9. Pshikhopov V. Kh., Medvedev M., Gajduk A., Belyaev V., Fedorenko R., Kruhmalev V. Position-trajectory control system for robot on base of airship. 2013, *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 3590–3595.

10. Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Yu., Gajduk A. R., Fedorenko R. V., Kruhmalev V. A., Gurenko B. V. Position-Trajectory Control System for Unmanned Robotic Airship. Preprints of the 19th World Congress the International Federation of Automatic Control. Cape Town, South Africa. August 24–29, 2014, pp. 8953–8958.

11. Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Y., and Gurenko B. V. Homing and Docking Autopilot Design for Autonomous Underwater Vehicle, *Applied Mechanics and Materials*, vol. 490–491 (2014), pp. 700–707. Trans Tech Publications, Switzerland. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.490-491.700.

12. Pshikhopov V. Kh., Fedotov A. A., Medvedev M. Ju., Medvedeva T. N., Gurenko B. V. *Pozicionno-traektorная sistema prjamo adaptivnogo upravlenija morskimi podvizhnymi ob'ektami* (Position-path system of a direct adaptive control for marine vehicles), *Inzhenernyj Vestnik Dona*, 2014, no. 3 (in Russian).

13. Pshikhopov V. Kh., Sukonkin S. Ja., Naguchev D. Sh., Strakovich V. V., Medvedev M. Ju., Gurenko B. V., Kostjukov V. A., Voloshhenko Ju. P. *Avtonomnyj podvodnyj apparat "Skat" dlja reshenija zadach poiska i obnaruzhenija zailennyh ob'ektov* (Autonomous underwater vehicle "Skat" for search and detection of objects silted), *Izvestija JuFU. Tehnicheskie Nauki*, 2010, no. 3 (104), pp. 153–162 (in Russian).

14. Gajduk A. R. *Sintez nelinejnyh sistem na osnove upravljaemoj formy Zhordana* (Design of nonlinear systems on base of controlled Jordan form), *Avtomatika i Telemehanika*, 2006, no. 7, pp. 3–13 (in Russian).

15. Rutkovskij V. Ju., Krutova I. N. *Princip postroenija i nekotorye voprosy teorii odnogo klassa samonastrajvajushhiesja sistem s model'ju* (Principle of construction and some questions of the one class theory of self-tuning systems with model), *Samonastrajvajushhiesja avtomaticheskie sistemy. Proc. of I All-Union Conference on theory and practice of self-tuning systems*, 10–14 December, 1963, Moscow, 1965, pp. 46–63 (in Russian).

16. Rutkovskij V. Ju., Ssorin-Chajkov V. N. *Samonastrajvajushhiesja sistemy s probnym signalom* (Self-tuning systems with a test signal), *Samonastrajvajushhiesja avtomaticheskie sistemy. Proc. of I All-Union Conference on theory and practice of self-tuning systems*, 10–14 December, 1963, Moscow, 1965, pp. 93–111 (in Russian).

17. Zemljakov S. D. Some problem of analytical synthesis in model reference control systems by the direct method of Lyapunov. Theory of self adaptive control system, *Proc. of International Symposium*, England, Teddington, 1965, New-York: P. H. Hummon Plenum Press, 1966, pp. 175—179.

18. Rutkovskij V. Ju. *Raboty instituta problem upravlenija v oblasti bespoiskovykh adaptivnykh sistem i sistem upravlenija kosmicheskimi apparatami* (Researches of Control Problem Institute in the field of searchless adaptive systems and space vehicles control systems), *Avtomatika i Telemekhanika*, 1999, no. 6, pp. 42—49 (in Russian).

19. Zemljakov S. D., Rutkovskij V. Ju. *O nekotoryh rezul'tatah razvitiya teorii i praktiki primeneniya bespoiskovykh adaptivnykh sistem* (About development of theory and practice of searchless adaptive systems), *Avtomatika i Telemekhanika*, 2001, no. 7, pp. 103—121 (in Russian).

20. Rutkovskij V. Ju., Glumov V. M., Suhanov V. M. *Fizicheski realizuemyj algoritm adaptivnogo upravlenija s jetalonnnoj model'ju* (Physically implemented algorithm of adaptive control with a reference model), *Avtomatika i Telemekhanika*. 2011, no. 8, pp. 96—108 (in Russian).

21. Zemljakov S. D., Rutkovskij V. Ju. *Algoritm funkcionirovanija adaptivnoj sistemy s jetalonnnoj model'ju, garantirujushhij zadannuju dinamicheskiju tochnost' upravlenija ne-stacionarnym dinamicheskim ob'ektom v uslovijah neopredelennosti* (Algorithm of the adaptive system with a reference model with given dynamical accuracy of control of time-depended dynamical object with uncertainties), *Avtomatika i Telemekhanika*, 2009, no. 10, pp. 35—44 (in Russian).

22. Glumov V. M., Zemljakov S. D., Rutkovskij V. Ju., Suhanov V. M. *Primenenie principa postroeniya adaptivnykh sistem s jetalonnnoj model'ju k zadacham monitoringa tekushhego so-stojanija transmisionnykh valov* (Application of the adaptive systems with a reference model principle for monitoring of line shafts state), *Avtomatika i Telemekhanika*, 2003, no. 5, pp. 131—146 (in Russian).

23. Medvedev M. Ju. *Algoritmy adaptivnogo upravlenija ispolnitel'nymi privodami* (Algorithms of an adaptive control of actuating motors), *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2006, no. 6, pp. 17—22 (in Russian).

УДК 681.51

DOI: 10.17587/mau.16.530-535

С. Л. Зенкевич, д-р физ.-мат. наук, проф., zenkev@bmstu.ru,

Н. К. Галустьян, аспирант, narekgalustyan@gmail.com,

Научно-учебный центр "Робототехника" МГТУ им. Н. Э. Баумана

Синтез и апробация алгоритма управления движением квадрокоптера по траектории

Решается задача управления по траектории движением квадрокоптера — беспилотного летательного аппарата, выполненного по вертолетной схеме с четырьмя пропеллерами. Решение этой задачи включило в себя следующие этапы: разработка динамической модели движения квадрокоптера, линеаризация динамической модели, синтез алгоритма управления движением по траектории с использованием ПД регулятора, построение моделей и компьютерная апробация разработанных алгоритмов.

Приведены результаты моделирования применения синтезированного алгоритма для управления движением квадрокоптера.

Ключевые слова: квадрокоптер, математическая модель, динамическая модель, угловая стабилизация, управление по траектории, моделирование движения

Введение

Одним из прогрессивных видов беспилотных летательных аппаратов микрокласса являются мультикоптеры, набирающие всю большую популярность в гражданском и военном секторах. Мультикоптеры, в частности квадрокоптеры, обладают всеми преимуществами летательных аппаратов вертолетного типа (возможностями зависания в пространстве, вертикального взлета и посадки, высокой маневренностью в закрытых помещениях и др.), при этом, в отличие от вертолетов, имеют простой и экономичный механизм, не требующий сложного технического обслуживания.

Данные летательные аппараты в полуавтономном режиме способны выполнять следующие задачи: инспекция в зонах пожаров, бедствий и разрушений; поисковые и спасательные операции; мониторинг зон с фото- и видеофиксацией; транспортировка полезных грузов; построение карт окружающей среды и др.

Анализ литературы показал, что система управления движением квадрокоптера базируется на линейно-квадратичных регуляторах [5], ПД или ПИД

регуляторах [1—4], нечетких регуляторах [7] и нейросетевых регуляторах. Интересными работами, посвященными системе управления квадрокоптером, можно считать работы [2—3], где для управления ориентацией квадрокоптера используется ошибка по матрице поворота, что позволяет обойтись без вычисления углов и связанных с этим сингулярностей. В работе [3] также рассмотрена реализованная и апробированная в лабораторных условиях система управления группой квадрокоптеров. Однако практическая ценность данной разработки является не очевидной, поскольку требуются точные координаты каждого квадрокоптера для плотного движения стро-ем (в лаборатории используется система камер).

Глубоким исследованием динамической модели движения квадрокоптера отличается работа [6], где аргументируется тот факт, что аэродинамика корпуса летающей платформы, эффект "биения лопасти", другие аэродинамические эффекты влияют незначительно на малых скоростях, например при зависании, однако уже на средних скоростях влияние усиливается.