

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУДНА ПО КРИВОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ

На основе нелинейной модели движения судна с помощью метода попятного синтеза управления (backstepping) разработан адаптивный алгоритм стабилизации движения судна на криволинейной траектории. Для неустойчивого на курсе речного судна выполнено моделирование автоматического управления перемещением судна по заданной траектории в условиях изменения коэффициентов нелинейной модели движения судна.

Введение

Построение адаптивных алгоритмов управления движением судов является актуальным по следующим причинам. Судно находится на границе раздела сред, поэтому изменение осадки, дифферента, крена или глубины приводят к изменению уравнений движения судна [1]. Для транспортных судов характерно значительное изменение осадки в процессе эксплуатации. Устойчивое на курсе судно может стать неустойчивым. При движении судов по рекам, в портах, в районах гидротехнических сооружений необходимо осуществлять точное автоматизированное движение по криволинейным траекториям.

Задача стабилизации судна на криволинейной траектории рассматривалась в ряде работ. Переход судна с одного прямолинейного участка на другой по дуге окружности в системе «Бирюза» осуществляется с помощью автоматического удерживания заданной угловой скорости поворота судна [2]. Угловая скорость рассчитывается по средней скорости хода с использованием специальных таблиц, что не может обеспечить точное движение судна по заданной дуге окружности из-за отсутствия учета текущих параметров модели движения судна.

В работе [3] предложен подход к синтезу оптимального закона управления при стабилизации судна на криволинейной траектории в условиях ветроволновых возмущений. Однако этот подход работает только вблизи заданной криволинейной траектории, так как при значительных отклонениях возможно появление сингулярности при пресечении судном какого-либо центра кривизны криволинейной траектории.

В диссертации [1] разработан алгоритм параметрической адаптации пропорционально-дифференциального закона управления движением судна, основанный на информации о текущих значениях показателей качества управления. В данной работе стабилизация движения судна на криволинейной траектории не рассматривалась.

В книге [4] представлены два метода стабилизации движения судна на криволинейной траектории, которые обеспечивают стремление к нулю бокового отклонения судна. Метод на основе ПИД закона управления и метод на основе

линейно-квадратичной задачи управления. Однако оба эти метода используют линейные модели движения судна, что не позволяет в полной мере учесть динамические свойства судна и, следовательно, может привести к понижению качества управления.

В работе [5] представлена методика построения закона управления движением при стабилизации объекта на заданной криволинейной траектории, которая гарантирует отсутствие сингулярностей в процессе управления, но учитывает только кинематику задачи управления и не учитывает инерционные свойства объекта управления. Указанная методика может быть использована как первый шаг при построении адаптивного алгоритма стабилизации движения судна на криволинейной траектории на основе нелинейной модели движения судна, описывающей неустойчивое на курсе судно.

Для построения алгоритма стабилизации применяется также метод попятного синтеза управления (backstepping), позволяющий разрабатывать адаптивные законы управления при непосредственном использовании нелинейной модели объекта управления и обладающий робастностью [6]. Иногда свойство робастности алгоритма управления может позволить отказаться от процесса адаптации. Подробное описание этого метода с применением его к разработке адаптивных систем управления дано в работах [6, 7], схема которого состоит в следующем. Упорядочим систему дифференциальных уравнений, описывающую процесс управления так, что начальные уравнения будут определять выходные переменные, а последним будет уравнение, содержащее управляющую переменную. Пусть для нескольких начальных уравнений и некоторой промежуточной переменной, условно объявленной управляющей, есть промежуточный закон управления, т.е. группа уравнений, охваченная некоторой обратной связью. Если уравнения, не охваченные обратной связью, имеют треугольную структуру [7, 8], то метод попятного синтеза управления позволяет модифицировать уже известный промежуточный закон управления и включить в группу уравнений, охваченных обратной связью, еще одно уравнение и т. д.

Построение адаптивного алгоритма управления

Пусть необходимо, чтобы центр масс p судна (рис. 1) двигался как можно ближе к заданной траектории, представляемой гладкой кривой. Заданная траектория описывается векторной функцией $p_d(u)$, зависящей от параметра u . Векторная функция $p_d(u)$ должна иметь покомпонентные производные второго порядка. Абсолютная величина текущей скорости судна p относительно инерциальной системы координат $\{a\}$ обозначается U , а направление вектора скорости ϕ . Пусть B – изображающая точка, перемещающаяся по заданной траектории с некоторой переменной скоростью U_B , имеющей направление ϕ_B в системе координат $\{a\}$.

Рассмотрим систему координат Серрет–Френе $\{b\}$ с началом, совпадающим с изображающей точкой B , с направлением оси X_b , совпадающим с направлением мгновенной скорости перемещения точки B .

Рассмотрим вектор ϵ , соединяющий изображающую точку B и точку p . Представим вектор ϵ в координатной системе $\{b\}$

$$\epsilon_{b,p}^b = \begin{bmatrix} s \\ e \end{bmatrix}.$$

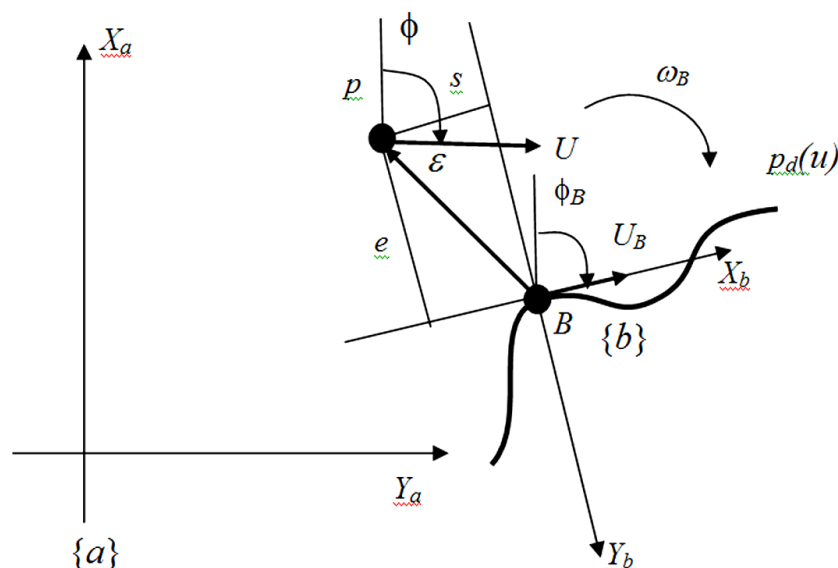


Рис. 1. Геометрическое представление условий задачи управления движением судна по заданной траектории

Очевидно, что траектория движения точки p будет сходиться к заданной траектории, если будет выполняться условие

$$\|\epsilon_{b,p}^b\| \longrightarrow 0 \quad \text{при} \quad t \longrightarrow \infty,$$

где $\|\epsilon_{b,p}^b\|$ – норма вектора $\epsilon_{b,p}^b$.

В статье [5] получено векторное дифференциальное уравнение

$$\dot{\epsilon}_{b,p}^b = V_{a,p}^b - V_{a,b}^b - S(\omega_{a,b}^b) \cdot \epsilon_{b,p}^b, \quad (1)$$

где $V_{a,p}^b$ – вектор скорости точки p в системе $\{b\}$; $V_{a,b}^b$ – вектор скорости начала координат системы Серрет–Френе; $\omega_{a,b}^b = (0 \quad 0 \quad \omega_B)^T$ – вектор скорости поворота системы $\{b\}$ относительно системы $\{a\}$ с угловой скоростью ω_B ; $S(\omega_{a,b}^b)$ – матрица, обеспечивающая вычисление координат вектора линейной скорости точки p , обусловленной вращением системы $\{b\}$ относительно системы $\{a\}$.

Векторное дифференциальное уравнение (1) можно преобразовать в систему скалярных дифференциальных уравнений, учитывая, что $\omega_B = c(u)UB$:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= U \cos(\phi - \phi_B) - U_B + c(u)U_B e; \\ \dot{e} &= U \sin(\phi - \phi_B) - c(u)U_B s, \end{aligned} \quad (2)$$

где $c(u)$ – кривизна траектории $p_d(u)$.

В работах [5, 9] показано, что если в качестве функции Ляпунова использовать функцию

$$V_1 = \frac{1}{2}(s^2 + e^2),$$

то закон управления скоростью перемещения изображающей точки

$$U_B = U \cos(\phi - \phi_B) + k_1 s, \quad (3)$$

где k_1 – положительная константа,

и закон управления направлением вектора скорости объекта

$$\phi = \arctg\left(-\frac{e}{\Delta}\right) + \phi_B \quad (4)$$

теоретически (без учета динамических свойств объекта) обеспечивают вывод объекта управления на заданную траекторию и стабилизацию движения объекта на этой траектории.

В процессе управления для перемещения изображающей точки используется уравнение

$$\dot{u} = \frac{U_B}{\sqrt{\left(\frac{dp_{dx}}{du}\right)^2 + \left(\frac{dp_{dy}}{du}\right)^2}}, \quad (5)$$

где p_{dx} и p_{dy} – координаты изображающей точки в системе координат $\{a\}$.

Уравнения (2) кинематические и не учитывают динамические свойства объекта управления. Для того чтобы построить алгоритм управления движением судна, дополним уравнения (2) уравнениями модели движения судна:

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= \omega; \\ \dot{\omega} &= b\delta + \Phi(\omega)^T \theta, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\Phi(\omega)$ – вектор-функция (функции-элементы могут быть нелинейными); ω – угловая скорость поворота корпуса судна; θ – вектор параметров модели движения судна; b – параметр модели движения судна; δ – угол отклонения руля от нейтрального положения.

В модели движения судна (6) предполагается, что угол дрейфа равен нулю.

Уравнения (6) имеют треугольную структуру, и, следовательно, для построения закона управления можно применить метод попятного синтеза управления. Для построения адаптивного алгоритма управления движением судна по заданной траектории применим методику, изложенную в книге [7, глава 4].

Первый шаг метода попятного синтеза управления. Если принимать во внимание динамические свойства судна, то в процессе управления направление вектора скорости судна ϕ будет отличаться от предписываемого выражением (4) на некоторую величину z_1 и может быть представлено следующим выражением:

$$\phi = \arctg\left(-\frac{e}{\Delta}\right) + \phi_B + z_1. \quad (7)$$

Предполагаем, что боковые отклонения судна от заданной траектории имеют небольшую величину, а если возникло значительное отклонение, то возврат на заданную траекторию выполняется по вновь рассчитанной гладкой кривой. Поэтому далее будем использовать упрощенное выражение для направления вектора скорости судна

$$\phi = -\gamma_1 \frac{e}{\Delta} + \phi_B + z_1, \quad (8)$$

где γ_1 – коэффициент для согласования размерности.

Для стабилизации судна на криволинейной траектории необходимо обеспечить стремление к нулю переменной z_1 .

Подставим (3) в производную от функции Ляпунова V_1 и получаем

$$\dot{V}_1 = -k_1 s^2 + eU \sin(\phi - \phi_B). \quad (9)$$

Используя (8), выполним преобразование функции (9)

$$\dot{V}_1 = -k_1 s^2 + eU \sin(-\gamma_1 \frac{e}{\Delta}) \cos(z_1) + eU \cos(-\gamma_1 \frac{e}{\Delta}) \sin(z_1). \quad (10)$$

Отрицательная определенность второго слагаемого выражения (10) возможна при условии $|z_1| < \frac{\pi}{2}$.

Для обеспечения стремления к нулю переменной z_1 в процессе управления дополним функцию Ляпунова V_1 слагаемым $\gamma_2 \frac{1}{2} z_1^2$. В результате получим новую функцию V_2

$$V_2 = \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{2} e^2 + \gamma_2 \frac{1}{2} z_1^2,$$

где γ_2 – положительная константа для согласования размерности слагаемых.

Слагаемые производной функции V_2 , которые являются отрицательно определенными, обозначим символом $\dot{\tilde{V}}_1$

$$\dot{\tilde{V}}_1 = -k_1 s^2 + eU \sin(-\gamma_1 \frac{e}{\Delta}) \cos(z_1).$$

Для производной функции V_2 получаем выражение

$$\dot{V}_2 = \dot{\tilde{V}}_1 + eU \cos(-\gamma_1 \frac{e}{\Delta}) \sin(z_1) + \gamma_2 z_1 \dot{z}_1. \quad (11)$$

Из соотношения (8) получаем выражение для производной переменной z_1

$$\dot{z}_1 = \dot{\phi} - \dot{\phi}_B + \gamma_1 \frac{\dot{e}}{\Delta}.$$

Используя (6) и обозначение ω_B для угловой скорости $\dot{\phi}_B$, получаем

$$\dot{z}_1 = \omega - \omega_B + \gamma_1 \frac{\dot{e}}{\Delta}. \quad (12)$$

Подставим выражение (12) в (11)

$$\dot{V}_2 = \dot{\tilde{V}}_1 + eU \cos(-\gamma_1 \frac{e}{\Delta}) \sin(z_1) + \gamma_2 z_1 \left(\omega - \omega_B + \gamma_1 \frac{\dot{e}}{\Delta} \right). \quad (13)$$

В качестве новой промежуточной управляющей переменной принимаем скорость поворота корпуса судна ω . Рассмотрим выражение для управляющей переменной ω , аналогичное (7) для направления вектора скорости судна

$$\omega = \alpha_1 + \omega_B + z_2, \quad (14)$$

где α_1 – функция, которая обеспечивает стремление к нулю переменной z_1 в процессе управления; z_2 – отклонение действительной величины $\omega - \omega_B$ от значения функции α_1 .

Подставим соотношение (14) в (13)

$$\dot{V}_2 = \dot{\tilde{V}}_1 + eU \cos(-\gamma_1 \frac{e}{\Delta}) \sin(z_1) + \gamma_2 z_1 \alpha_1 + \gamma_2 z_1 z_2 + \gamma_2 z_1 \gamma_1 \frac{\dot{e}}{\Delta}.$$

Для того чтобы функция α_1 обеспечивала стремление к нулю переменной z_1 в процессе управления, должно выполняться соотношение

$$-k_2 z_1^2 = eU \cos(-\gamma_1 \frac{e}{\Delta}) \sin(z_1) + \gamma_2 z_1 \alpha_1 + \gamma_2 z_1 \gamma_1 \frac{\dot{e}}{\Delta}. \quad (15)$$

где k_2 – положительная константа.

Из соотношения (15) получаем

$$\alpha_1 = -\frac{k_2}{\gamma_2} z_1 - \frac{1}{\gamma_2} eU \cos(-\gamma_1 \frac{e}{\Delta}) \frac{\sin(z_1)}{z_1} - \gamma_1 \frac{\dot{e}}{\Delta}. \quad (16)$$

Учитывая (16), получаем выражение, которое необходимо для обеспечения стремления к нулю переменной z_1 в процессе управления.

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 - k_2 z_1^2 + \gamma_2 z_1 z_2.$$

Второй шаг метода попятного синтеза управления. Для обеспечения стремления к нулю переменной z_2 в процессе управления дополним функцию Ляпунова V_2 слагаемым $\gamma_3 \frac{1}{2} z_2^2$. Для обеспечения адаптации вектора коэффициентов θ к истинным значениям, дополним функцию Ляпунова V_2 слагаемым $\frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta}$, где $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ – разность между вектором истинных значений коэффициентов θ и вектором оценок $\hat{\theta}$; Γ – квадратная положительно определенная матрица констант.

В результате получаем новую функцию Ляпунова V_3

$$V_3 = \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{2} e^2 + \gamma_2 \frac{1}{2} z_1^2 + \gamma_3 \frac{1}{2} z_2^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta}.$$

Слагаемые производной функции V_3 , которые являются отрицательно определенными, обозначим символом $\dot{V}_2$

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 - k_2 z_1^2.$$

Теперь для производной функции V_3 имеем

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_2 + z_2(\gamma_2 z_1 + \gamma_3 \dot{z}_2) + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}}. \quad (17)$$

Из соотношения (14) получаем

$$\dot{z}_2 = \dot{\omega} - \dot{\omega}_b - \dot{\alpha}_1. \quad (18)$$

В выражении (18) заменим производную $\dot{\omega}$ на правую часть уравнения (6) и учтем, что $\theta = \hat{\theta} + \tilde{\theta}$

$$\dot{z}_2 = b\delta + \Phi^T(\omega)(\hat{\theta} + \tilde{\theta}) - \dot{\omega}_b - \dot{\alpha}_1. \quad (19)$$

Для того чтобы за счет выбора функции δ обеспечивалось стремление к нулю переменной z_2 в процессе управления, должно выполняться соотношение (см. (17) и (19))

$$-k_3 z_2 = \gamma_2 z_1 + \gamma_3 (b\delta + \Phi^T(\omega)\hat{\theta} - \dot{\omega}_b - \dot{\alpha}_1), \quad (20)$$

где k_3 – положительная константа.

Из выражения (20) найдем закон управления углом перекладки руля, обеспечивающий движение судна по заданной траектории

$$\delta = \frac{1}{b} \left(-\frac{k_3}{\gamma_3} z_2 - \frac{\gamma_2}{\gamma_3} z_1 - \Phi^T(\omega)\hat{\theta} + \dot{\omega}_b + \dot{\alpha}_1 \right). \quad (21)$$

Используя (21), получаем новое выражение для производной функции V_3

$$\dot{V}_3 = \dot{\tilde{V}}_2 - k_3 z_2^2 + \gamma_3 z_2 \Phi^T(\omega) \tilde{\theta} + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}}.$$

Чтобы функция $\dot{V}_3$ была отрицательно определенной, необходимо, чтобы сумма двух последних слагаемых равнялась нулю. Используя это условие, выполним преобразования, которые позволят получить дифференциальное уравнение для вектора оценок $\hat{\theta}$ (учтем, что вектор истинных значений θ – константа и, следовательно, $\dot{\tilde{\theta}} = -\dot{\hat{\theta}}$)

$$\begin{aligned} 0 &= \gamma_3 z_2 \Phi^T(\omega) \tilde{\theta} + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} = \gamma_3 z_2 \tilde{\theta}^T \Phi(\omega) + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} = \\ &= \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} (\gamma_3 z_2 \Gamma \Phi(\omega) + \dot{\tilde{\theta}}) = \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} (\gamma_3 z_2 \Gamma \Phi(\omega) - \dot{\hat{\theta}}). \end{aligned}$$

Получаем дифференциальное уравнение для оценок вектора параметров $\hat{\theta}$

$$\dot{\hat{\theta}} = \gamma_3 z_2 \Gamma \Phi(\omega). \quad (22)$$

В работе [7] показано, если известна только приближенная величина коэффициента $\hat{b}$ и точно известен его знак, то для обеспечения сходимости $\hat{\rho} = \frac{1}{\hat{b}}$ к

точному значению $\rho = \frac{1}{b}$ можно использовать дифференциальное уравнение

$$\dot{\hat{\rho}} = -k_4 \cdot \text{sgn}(b) \cdot \left(-\frac{k_3}{\gamma_3} z_2 - \frac{\gamma_2}{\gamma_3} z_1 - \Phi^T(\omega) \hat{\theta} + \dot{\omega}_B + \dot{\alpha}_1 \right) z_2, \quad (23)$$

где k_4 – положительная константа.

Объединяя (3), (5), (21)–(23), получаем адаптивный алгоритм управления движением судна с оценкой приближенно известных или медленно изменяющихся параметров модели движения судна:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_b = U \cdot \cos(\phi - \phi_B) + k_1 s; \\ \dot{u} = \frac{U_B}{\sqrt{\left(\frac{dp_{dx}}{du} \right)^2 + \left(\frac{dp_{dy}}{du} \right)^2}}; \\ \delta = \hat{\rho} \left(-\frac{k_3}{\gamma_3} z_2 - \frac{\gamma_2}{\gamma_3} z_1 - \Phi^T(\omega) \hat{\theta} + \dot{\omega}_B + \dot{\alpha}_1 \right); \\ \dot{\hat{\theta}} = \gamma_3 z_2 \Gamma \Phi(\omega); \\ \dot{\hat{\rho}} = -k_4 \cdot \text{sgn}(b) \left(-\frac{k_3}{\gamma_3} z_2 - \frac{\gamma_2}{\gamma_3} z_1 - \Phi^T(\omega) \hat{\theta} + \dot{\omega}_B + \dot{\alpha}_1 \right) z_2. \end{array} \right. \quad (24)$$

Вычислительный эксперимент

Для испытания работоспособности адаптивного алгоритма управления (24) была использована нелинейная модель движения судна, которая позволяет исследовать неустойчивые на курсе суда [1]

$$\dot{\omega} = b\delta + \theta_1 \omega + \theta_2 |\omega| \omega, \quad (25)$$

где b, θ_1, θ_2 – коэффициенты.

На основании результатов обработки измерений параметров движения речного судна [1] получены два набора коэффициентов модели (25), представленные в таблице.

	b, c^{-2}	θ_1, c^{-1}	$\theta_2, \text{град}^{-1}$
Вариант 1	2.91×10^{-4}	7.95×10^{-4}	-5.93×10^{-3}
Вариант 2	7.12×10^{-5}	3.73×10^{-3}	-9.21×10^{-3}

Вариант 1 соответствует движению судна на глубокой воде, вариант 2 – на мелкой воде. Диаграммы управляемости модели движения судна (25) для вариантов коэффициентов 1 и 2 соответствуют неустойчивому на курсе судну (рис. 2).

При моделировании в MathCAD использовались следующие настраиваемые коэффициенты:

$$\gamma_1 = 1 \text{ град}; \quad \Delta = 200 \text{ м}; \quad \gamma_2 = 5 \times 10^3 \frac{\text{м}^2}{\text{град}^2}; \quad \gamma_3 = 2,5 \times 10^6 \frac{\text{м}^2 \times c^2}{\text{град}^2};$$

$$k_1 = 0,5; \quad k_2 = 500; \quad k_3 = 10^4; \quad k_4 = 3,5 \times 10^6; \quad \Gamma = \begin{bmatrix} 4,8 \times 10^{-8} & 0 \\ 0 & 4,8 \times 10^{-8} \end{bmatrix}.$$

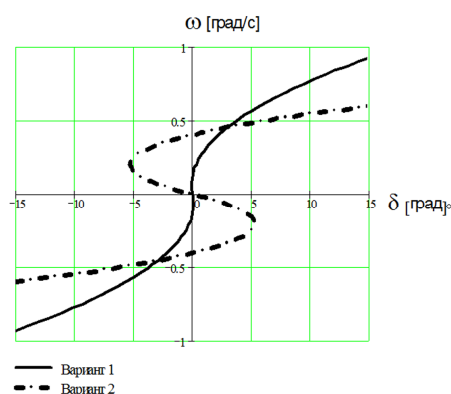


Рис. 2. Диаграммы управляемости модели движения судна для вариантов коэффициентов 1 и 2



Рис. 3. Заданная траектория движения судна

В вычислительных экспериментах автоматическое управление движением судна осуществляется по заданной траектории в форме полуокружности радиусом 2000 м (рис. 3). В диапазоне Y от -1000 до 1000 м находится мелководный участок. Были проведены два вычислительных эксперимента по автоматическому управлению движением судна с использованием адаптации коэффициентов b , θ_1 , θ_2 и без адаптации (рис. 4 и 5).

Из рис. 4 видно, что при адаптации максимальное боковое отклонение центра масс судна от заданной траектории уменьшается в два раза и имеет тенденцию к снижению при движении по мелководью.

Графики изменения угла перекладки руля (рис. 5) показывают, что в варианте с адаптацией максимальное отклонение угла перекладки руля от установившегося значения при движении по мелководью больше, но переходной процесс заканчивается раньше, чем в варианте без адаптации.

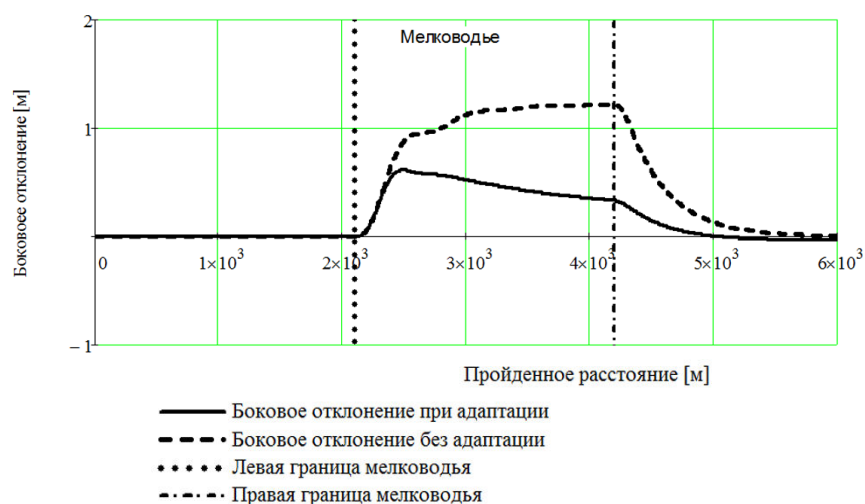


Рис. 4. Боковое отклонение центра масс судна ϵ с адаптацией коэффициентов b , θ_1 , θ_2 и без адаптации



Рис. 5. Графики изменения коэффициентов b , θ_1 , θ_2 в процессе адаптации

Выводы

В работе с помощью метода попятного синтеза управления на основе нелинейной модели движения судна разработан адаптивный алгоритм управления движением (24). Для неустойчивого на курсе речного судна (25) выполнено моделирование автоматического управления перемещением судна по заданной траектории в условиях изменения коэффициентов нелинейной модели движения судна.

Вычислительный эксперимент показал, что применение адаптации коэффициентов модели движения судна к условиям плавания увеличивает точность следования заданной криволинейной траектории движения. Однако если требо-

вания к точности следования заданной траектории не являются очень жесткими, то алгоритм обеспечивает следование заданной траектории и без адаптации коэффициентов модели движения судна. Представленный алгоритм может использоваться для управления необитаемыми аппаратами, включая задачи, требующие осуществления движения по траекториям сложной формы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Поселенов Е.Н.** Обоснование и разработка адаптивного алгоритма управления движением речного водоизмещающего судна на мелководье: Дисс. на соискание ученой степени к. т. н. Волжская государственная академия водного транспорта. На правах рукописи. – Нижний Новгород. – 2010.
2. **Якушенков, А.А.** Результаты разработки и судовых испытаний системы автоматизации судовождения «Бирюза» / А.А.Якушенков [и др.] // В кн.: Навигация и управление судном. – Л.: Транспорт.- 1986. - С. 3-18.
3. **Пелевин, А.Е.** Стабилизация движения судна на криволинейной траектории//Гироскопия и навигация.- 2002. - №2. - С. 3-11.
4. **Fossen, Thor I.** Marine control systems. Marine Cybernetics. – Trondheim. Norway. – 2002.
5. **Довгоброд, Г.М.** Упрощенное построение закона управления направлением вектора скорости, обеспечивающего движение объекта по криволинейной траектории / Г.М.Довгоброд, Л.М.Клячко // Гироскопия и навигация.- 2011. - № 3.- С. 24-33.
6. **Мирошник, И.В.** Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами/ И.В.Мирошник, В.О.Никифоров, А.А.Фрадков. - СПб.: Наука, 2000 - 549 с.
7. **Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P.** Nonlinear and adaptive control design. John Wiley & Sons, inc. – New York. – 1995.
8. **Халил Х.К.** Нелинейные системы. - М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2009. – 832 с.
9. **Morten Breivik, Thor I. Fossen.** Path Following for Marine Surface Vessels. Proceedings of the OTO'04, Kobe, Japan.

Abstract. An adaptive algorithm for motion control (24) has been developed on the basis of a linear model of ship motion with the use of the backstepping method. Simulation of automatic ship control in the course of ship motion on a predetermined path has been carried out in the conditions of varying coefficients of the nonlinear model of ship motion for an unsteady river boat. The computing experiment has shown that adaption of ship motion model coefficients to sailing conditions improves the accuracy in following a nonlinear motion path. However, if the requirements for accuracy in following a predetermined path are not very strict, the algorithm provides for following on a predetermined path, even without adaptation of the coefficients of the ship motion model. The algorithm developed can be used to control unmanned submersible, including performance of tasks concerned with motion on intricately-shaped paths.

Key words: nonlinear model, control, backstepping method for control synthesis, adaptive algorithm, ship displacement automatic control simulation

Материал поступил 2.03.11