

УДК 517.72

А.А. Кабанов, ст. преподаватель*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: patronne@mail.ru***РОБАСТНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ БОКОВОГО ДВИЖЕНИЯ СУДНА НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ**

Синтезирована система робастной стабилизации бокового движения судна на воздушной подушке, основанная на сингулярно возмущенном описании неопределенности в параметрах системы. Показатель робастности определяется на основе оценки жесткости замкнутой системы. Приведены результаты моделирования в системе Matlab.

Ключевые слова: робастность, робастная стабилизация, судно на воздушной подушке, жесткость, сингулярное возмущение.

Введение. Обеспечение безопасности движения судов является важнейшей задачей судовождения и остается актуальной в настоящее время. Данная задача обладает особой остротой для скоростных судов, в том числе и для судов на воздушной подушке (СВП), которые в силу особенности своей динамики имеют малый запас устойчивости.

Непосредственной причиной потери устойчивости движения СВП оказывается явление «зарывания» – затягивание гибкого ограждения (ГО) внутрь воздушной подушки [1, 2]. Зарывание СВП может иметь два последствия: нарушение устойчивости с последующим восстановлением и опрокидывание судна. Основная причина опрокидывания СВП на тихой воде – приложение к судну чрезмерного кренящего и дифферентующего на нос моментов, вызванных контактом ГО с водой.

Опыт исследований показывает, что возможность опрокидывания возникает при больших углах, что влечет за собой затягивание ГО под корпус с последующим подломом [1, 2]. На практике это явление сопровождается резким замедлением скорости хода СВП со значительным ростом дифферента на нос, а также увеличением крена вплоть до опрокидывания. При движении СВП с большей скоростью подлом ГО может наступить и при меньших углах дрейфа, т.е. с увеличением скорости максимальный угол дрейфа уменьшается. В связи с этим при маневрировании СВП нужно обеспечить как можно меньшее значение угла дрейфа, для избегания опрокидывания и повышения безопасности движения.

Одним из направлений достижения безопасности является повышение автоматизации движения. Важным этапом разработки систем и алгоритмов автоматического управления движением является разработка математической модели движения судна. В общем случае математическая модель СВП (как и любого морского судна) представляет собой систему сложных нелинейных дифференциальных уравнений. Они описывают связь угловых и линейных ускорений, скоростей и координат судна с силами и моментами сил, создаваемых движителями и внешней средой [1–3].

Движение СВП связано в первую очередь с созданием сил и моментов, прикладываемых к корпусу судна, при этом масса его имеет существенное значение для динамики процессов управления движением. В связи с непредсказуемым характером загрузки судна оценка массы может находиться в достаточно широких пределах. Это усложняет построение системы управления. Кроме того, описание гидродинамических сил и моментов сопротивления также в значительной мере неопределенно. Различные авторы приводят существенно отличающиеся математические соотношения для описания указанных сил и моментов [1–3]. Также движение судна связано и с влиянием возмущающих воздействий внешней среды. К ним относятся, главным образом, воздействие со стороны морского волнения и ветра. Априорная оценка таких факторов невозможна. В связи с этим при построении системы управления движением судна должны выбираться такие законы управления, которые смогли бы обеспечить некоторое гарантированное качество процессов управления, а сама система управления, в первую очередь, удовлетворяла требованию робастности, т.е. обладала способностью функционировать надлежащим образом при наличии неопределенности в управляемом процессе.

Данная работа посвящена вопросу построения робастной системы стабилизации бокового движения СВП.

1. Уравнения бокового движения СВП. При описании бокового движения СВП используются полусвязанная и связанная системы координат (рисунок 1). СВП имеет шесть степеней свободы, однако влияние динамики по дифференту и высоте центра масс на боковое движение СВП мало. Для анализа бокового движения СВП (при отсутствии течения) можно использовать следующую систему четырех уравнений [3]:

$$\begin{aligned}
m \left(\frac{dV_x}{dt} + \omega_y V_z \right) &= F_x(V, \beta, \vartheta, \omega_y, \delta, V_B, \xi_w, h_{MB}, \xi_{MB}, t), \\
m \left(\frac{dV_z}{dt} - \omega_y V_x \right) &= F_z(V, \beta, \vartheta, \omega_y, \delta, V_B, \xi_w, h_{MB}, \xi_{MB}, t), \\
J_x \frac{d\omega_x}{dt} &= M_x(V, \beta, \vartheta, \omega_y, \delta, V_B, \xi_w, h_{MB}, \xi_{MB}, t), \\
J_y \frac{d\omega_y}{dt} &= M_y(V, \beta, \vartheta, \omega_y, \delta, V_B, \xi_w, h_{MB}, \xi_{MB}, t),
\end{aligned} \tag{1}$$

где m, J_x, J_y – масса и моменты инерции СВП по соответствующим осям; V, V_x, V_z – скорость судна и ее проекции; ω_x, ω_y – угловые скорости вращения; β, ϑ, δ – соответственно, углы дрейфа, крена и перекадки аэроуля; V_B, ξ_B – скорость ветра и угол встречи ветра с корпусом судна; h_{MB}, ξ_{MB} – высота волны 3 %-й обеспеченности и угол волнового склона; F_x, F_z, M_x, M_y – суммарные силы и моменты, действующие на СВП: гидродинамические, аэродинамические, импульсные силы и моменты, а также силы и моменты от средств управления движением (вертикальные аэроули, горизонтальные аэроули, ВИШ – винты изменяемого шага) и силы и моменты от волнового воздействия.

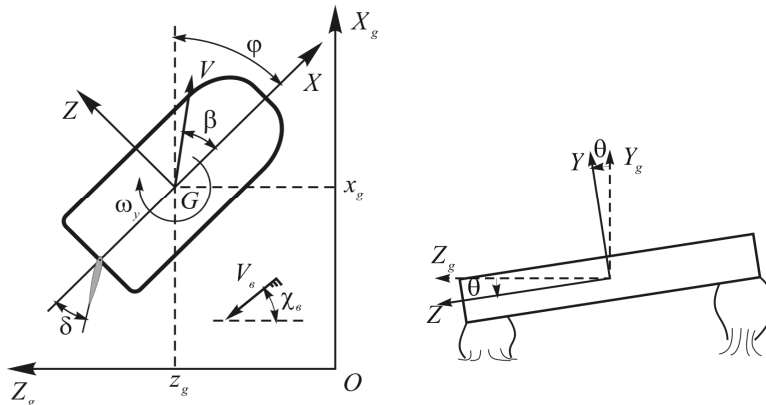


Рисунок 1 – Системы координат при описании бокового движения СВП

Уравнения движения являются нелинейными, так как зависимость сил и моментов от скорости хода, углов крена и дрейфа, угловых скоростей рыскания и крена, угла перекадки руля, скорости и направления ветра являются нелинейными. При наличии волнения силы и моменты являются случайными функциями, спектральные плотности энергии которых зависят от высоты волны, угла встречи с волной и скорости хода СВП.

Для синтеза и анализа регулятора стабилизации путевого угла можно перейти к более простой модели движения, так как при работе регулятора стабилизации путевого угла СВП движется вблизи балансирующего режима.

При переходе к упрощенной модели движения от системы (1) принимаются следующие допущения: скорость хода считается постоянной, пренебрегается влиянием на рыскание со стороны бортовой качки. Также учитываются соотношения: $V_x = V \cos \beta$, $V_z = V \sin \beta$. Таким образом, упрощенные уравнения движения СВП имеют вид [1, 2]:

$$\begin{aligned}
\dot{\varphi}(t) &= \omega_y(t), \\
\dot{\omega}_y(t) &= a_{22}\omega_y(t) + a_{23}\beta(t) + a_{24}\theta(t) + b_2\delta(t), \\
\dot{\beta}(t) &= a_{32}\omega_y(t) + a_{33}\beta(t) + a_{34}\theta(t) + b_3\delta(t), \\
\dot{\theta}(t) &= \omega_x(t) + c_4 f_B(t), \\
\dot{\omega}_x(t) &= a_{52}\omega_y(t) + a_{53}\beta(t) + a_{54}\theta(t) + a_{55}\omega_x(t) + c_5 f_B(t),
\end{aligned} \tag{2}$$

где $f_B(t)$ – случайный процесс, представляющий собой возмущение от бортовой качки. Уравнения (2) можно записать в матричном виде:

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + B\delta(t) + Gf_B(t), \quad A \in R^{5 \times 5}, \quad B, G \in R^5, \tag{3}$$

где матрицы состояния равны

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{32} & a_{24} & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{pmatrix}, \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ b_2 \\ b_3 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ c_4 \\ c_5 \end{pmatrix}.$$

Модель (3) описывает СВП как объект с вектором состояний $x(t) = (\varphi, \omega_Y, \beta, \theta, \omega_X)^T$, скалярным управлением $\delta(t)$ и внешним возмущением $f_B(t)$.

2. Синтез системы робастной стабилизации путевого угла СВП. Система стабилизации бокового движения СВП относится к классу многомерных систем, при синтезе которых обычно используется аппарат оптимального управления. Однако присутствие неопределенности, обусловленной невозможностью точно определить параметры модели управляемого процесса, существенно препятствует применению этого математического аппарата, в том смысле, что при изменении параметров исходной модели уже нельзя будет гарантировать устойчивость и качество процесса управления.

Для описания неопределенности и анализа робастных свойств замкнутой системы будем использовать сингулярно возмущенный подход, описанный во втором разделе. В рассматриваемом случае необходимо предусмотреть наличие неточности в определении расчетных параметров модели (3), т.е. в коэффициентах a_{ij} , b_i , c_i , $i = \overline{2,5}$. Модель (3) с учетом неопределенности можно представить в другом виде [4] (здесь сделана перестановка 4-го столбца и 4-ой строки матрицы $\mathbf{A}$, чтобы структурировать информацию нужным образом):

$$\frac{d\tilde{x}(t)}{dt} = \mathbf{A}(\lambda)\tilde{x}(t) + \mathbf{B}(\lambda)\delta(t) + \mathbf{C}(\lambda)f_B(t), \quad (4)$$

где матрицы состояния равны

$$\mathbf{A}(\lambda) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \lambda^{-1}a_{24} & \lambda^{-1}a_{22} & \lambda^{-1}a_{23} & 0 \\ 0 & \lambda^{-1}a_{34} & \lambda^{-1}a_{32} & \lambda^{-1}a_{33} & 0 \\ 0 & \lambda^{-1}a_{54} & \lambda^{-1}a_{52} & \lambda^{-1}a_{53} & \lambda^{-1}a_{55} \end{pmatrix}, \mathbf{B}(\lambda) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \lambda^{-1}b_2 \\ \lambda^{-1}b_3 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{C}(\lambda) = \begin{pmatrix} 0 \\ c_4 \\ 0 \\ 0 \\ \lambda^{-1}c_5 \end{pmatrix}.$$

В (4) $\lambda > 0$ – неизвестный параметр, выступает в роли неопределенности, $\tilde{x}(t) = (\varphi, \theta, \omega_Y, \beta, \omega_X)^T$ – вектор состояния. Задача заключается в выборе такого стабилизирующего управления $\delta(t) = u_{stab}(t)$, независящего от параметра λ , что при всех $\lambda \in (0, \lambda_*)$ синтезированная система (4) будет устойчива. При этом она (система) будет обладать тем большими робастными свойствами, чем больше будет допустимое критическое значение параметра неопределенности λ_* . Стабилизирующее управление будем искать в виде $\delta(t) = (g_1 \ g_2 \ g_3 \ g_4 \ 0)\tilde{x}(t)$. Подставляя это выражение в (4), получаем матрицу замкнутой системы

$$\mathbf{A}_Z = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \lambda^{-1}\bar{a}_{21} & \lambda^{-1}\bar{a}_{24} & \lambda^{-1}\bar{a}_{22} & \lambda^{-1}\bar{a}_{23} & 0 \\ \lambda^{-1}\bar{a}_{31} & \lambda^{-1}\bar{a}_{34} & \lambda^{-1}\bar{a}_{32} & \lambda^{-1}\bar{a}_{33} & 0 \\ 0 & \lambda^{-1}a_{54} & \lambda^{-1}a_{52} & \lambda^{-1}a_{53} & \lambda^{-1}a_{55} \end{pmatrix},$$

для которой необходимые и достаточные условия гурвицевости (условия теоремы Климушева — Красовского) для всех $0 < \lambda < 1/\vartheta_*$ имеют вид:

$$\operatorname{Re}(\gamma_S) < 0, \operatorname{Re}(\gamma_f) < 0, \quad (5)$$

где γ_S – собственные числа матрицы $\bar{\mathbf{A}}_S = -\mathbf{A}_{12}\bar{\mathbf{A}}_{22}^{-1}\bar{\mathbf{A}}_{21}$, γ_f – собственные числа матрицы $\bar{\mathbf{A}}_{22}$,

$$\bar{\mathbf{A}}_{21} = \begin{pmatrix} \bar{a}_{21} & \bar{a}_{24} \\ \bar{a}_{31} & \bar{a}_{34} \\ 0 & a_{54} \end{pmatrix}, \mathbf{A}_{12} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \bar{\mathbf{A}}_{22} = \begin{pmatrix} \bar{a}_{22} & \bar{a}_{23} & 0 \\ \bar{a}_{32} & \bar{a}_{33} & 0 \\ a_{52} & a_{53} & a_{55} \end{pmatrix}.$$

Соответствующая оценка жесткости определяется выражением [6]:

$$\vartheta_* = \max_i \left(\max_{\bar{\omega}: \text{Im}(k_i(\bar{\omega}))=0} \text{Re}(k_i(\bar{\omega})) \right), \quad k_i(\omega) = \frac{1}{\gamma_i(\omega)}, \quad i = \overline{1,5}, \quad (6)$$

где через $\gamma_i(\omega), i = \overline{1,5}$, обозначены собственные значения матрицы $M(j\omega)$:

$$M(s = j\omega) = (sI - \bar{A})^{-1} \underline{A}, \quad \bar{A} = \begin{pmatrix} 0 & A_{12} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \underline{A} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \bar{A}_{21} & \bar{A}_{22} \end{pmatrix}.$$

Задачу повышения робастности можно сформулировать как задачу минимизации оценки (6) при ограничении (5).

Выбор регулятора, удовлетворяющего условиям (5) удобно реализовать на основе процедуры композиционного синтеза стационарного субоптимального регулятора [5]

$$\mathbf{G}_c = (\mathbf{G}_{c1} \quad \mathbf{G}_f), \quad \mathbf{G}_{c1} = (1 + \mathbf{G}_f \mathbf{A}_{22}^{-1} \mathbf{B}_2) \mathbf{G}_s = (g_{21} \quad g_{22}), \quad \mathbf{G}_f = (g_3 \quad g_4 \quad 0), \quad (7)$$

где матрица коэффициентов $\mathbf{G}_f$ находится из решения задачи на минимум критерия

$$J_f = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{\infty} (q_3 \omega_Y^2(t) + q_4 \beta^2(t) + q_5 \omega_X^2(t) + r \delta_f^2(t)) dt \rightarrow \min_{\delta_f} \quad (8)$$

на движениях так называемой «быстрой» системы

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \omega_Y \\ \beta \\ \omega_X \end{pmatrix} = \mathbf{A}_{22} \begin{pmatrix} \omega_Y \\ \beta \\ \omega_X \end{pmatrix} + \mathbf{B}_2 \delta_f, \quad \mathbf{A}_{22} = \begin{pmatrix} a_{22} & a_{23} & 0 \\ a_{32} & a_{33} & 0 \\ a_{52} & a_{53} & a_{54} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B}_2 = \begin{pmatrix} b_2 \\ b_3 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

а матрица $\mathbf{G}_s$ определяется из решения задачи минимизации критерия

$$J_s = \frac{1}{2} \int_{t_f}^{\infty} (q_1 \phi^2(t) + q_2 \theta^2(t) + r \delta_s^2(t)) dt \quad (10)$$

на движениях «медленной» системы

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \phi \\ \theta \end{pmatrix} = -\mathbf{A}_{12} \mathbf{A}_{22}^{-1} \mathbf{A}_{21} \begin{pmatrix} \phi \\ \theta \end{pmatrix} - \mathbf{A}_{12} \mathbf{A}_{22}^{-1} \mathbf{B}_2 \delta_s, \quad \mathbf{A}_{12} = \begin{pmatrix} 0 & a_{24} \\ 0 & a_{34} \\ 0 & a_{54} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A}_{22} = \begin{pmatrix} a_{22} & a_{23} & 0 \\ a_{32} & a_{33} & 0 \\ a_{52} & a_{53} & a_{55} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Решая задачу (8), (9), находим матрицу $\mathbf{G}_f = -\mathbf{B}_2^T \mathbf{K}_f / r$, где $\mathbf{K}_f$ удовлетворяет алгебраическому уравнению Риккати

$$0 = -\mathbf{A}_{22}^T \mathbf{K}_f - \mathbf{K}_f \mathbf{A}_{22} - \mathbf{Q}_2 + \mathbf{K}_f \mathbf{B}_2 \mathbf{B}_2^T \mathbf{K}_f / r, \quad \mathbf{Q}_2 = \text{diag}(q_3, q_4, q_5).$$

Матрица $\mathbf{G}_s$ вычисляется из решения задачи (10), (11) и равна $\mathbf{G}_s = (\mathbf{A}_{12} \mathbf{A}_{22}^{-1} \mathbf{A}_{21})^T \mathbf{K}_s / r$, где $\mathbf{K}_s$ – положительно-определенное решение уравнения

$$0 = (\mathbf{A}_{12} \mathbf{A}_{22}^{-1} \mathbf{A}_{21})^T \mathbf{K}_s + \mathbf{K}_s \mathbf{A}_{12} \mathbf{A}_{22}^{-1} \mathbf{A}_{21} - \mathbf{Q}_2 + \mathbf{K}_s \mathbf{A}_{12} \mathbf{A}_{22}^{-1} \mathbf{B}_2 (\mathbf{A}_{12} \mathbf{A}_{22}^{-1} \mathbf{B}_2)^T \mathbf{K}_s / r, \quad \mathbf{Q}_2 = \text{diag}(q_1, q_2).$$

Матрицы $\mathbf{G}_f$ и $\mathbf{G}_s$ можно просто вычислить, используя средства пакета инженерных программ Matlab, а именно функцию *care* [6]. Задачи (8) - (11) не зависят друг от друга и могут решаться параллельно, причем размерность этих задач меньше размерности исходной задачи, что позволяет существенно снизить требования к бортовому компьютеру.

Композиционный стационарный регулятор (7) обеспечивает выполнение условия (5) и наделяет систему свойством робастности по параметру неопределенности λ . При этом он (регулятор) сочетает в себе свойства субоптимальности в смысле минимизации критериев (10) и (8). Следует добавить, что выбором коэффициентов штрафа $q_i, i = \overline{1,5}$ можно изменять качество стабилизации бокового движения СВП.

3. Система имитационного моделирования бокового движения СВП. Для моделирования синтезированной системы стабилизации используются средства пакета инженерных прикладных программ MATLAB, а именно *Control System toolbox* и *Guide User Interface* [6], с помощью которых была разработана программа имитационного моделирования движения СВП (вид главного окна программы показан на рисунке 2).

Панель управления программы содержит следующие управляющие элементы:

- «Ввод параметров СВП» – кнопка, предназначенная для ввода коэффициентов линеаризованной модели (2) бокового движения СВП, параметров балансировочного режима, параметров динамики рулевого привода и размаха неопределенности в виде значения параметра λ ;
- «Ввод параметров регулятора» – кнопка предназначена для ввода параметров управления. Здесь предусмотрено два варианта управления – «Робастный регулятор» – реализует робастный субоптимальный регулятор (7) и «ПИД-регулятор» – реализует стандартный ПИД-регулятор с указанными параметрами по углу рыскания;
- «Ввод параметров возмущений» – кнопка предназначена для ввода параметров внешних возмущений (скорость ветра, сила и момент от морского волнения);
- «Моделирование» – моделирование системы с заданными параметрами;
- «Выход» – завершение работы программы.

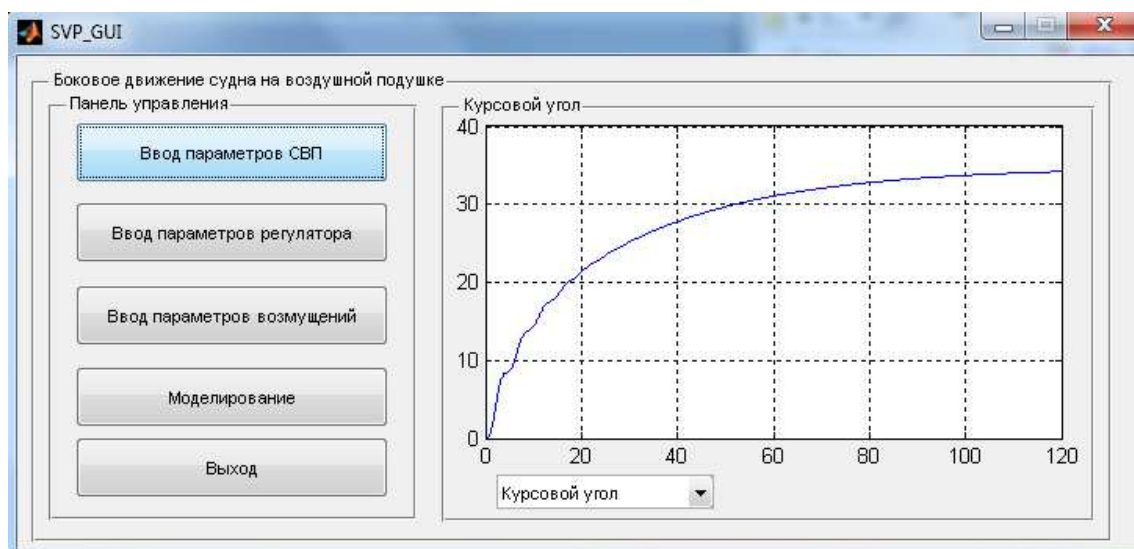


Рисунок 2 – Главное окно программы моделирования

Панель результатов представляет собой графическое окно (рисунок 2) с выпадающим контекстным меню, предназначенным для выбора параметров движения, осциллограммы которых необходимо построить. Предусмотрен вывод курсового угла φ , град, угла дрейфа β , град, путевого угла $\psi = \varphi - \beta$, град, угловой скорости рыскания ω , град/с, скорости движения V , м/с, перемещения $z_g = f(x_g)$, м, угла перекладки аэроула δ , град.

4. Результаты моделирования системы стабилизации. Для моделирования синтезированной робастной системы стабилизации в качестве численных значений коэффициентов линеаризованной модели бокового движения (4) возьмем данные для СВП массой $m = 26,6 \cdot 10^3$, кг, длиной $l = 20$, м, шириной $b = 7,6$, м, площадью подушки $S = 146$, м, скоростью хода $V_0 = 25,4$, м/с [2]:

$$a_{22} = -0,26, a_{23} = 0, a_{32} = 1, a_{33} = -0,085, \\ b_{21} = 0,578, b_{31} = 0,082, c_2 = 0,38, c_3 = 0,21.$$

Параметры балансировочного режима выберем такими: $V_0 = 25,4$, $\omega_0 = \beta_0 = 0$, $\varphi_0 = 30$.

Параметры рулевого тракта: $k_\delta = 0,1$, $\delta_{\max} = 35$, $\delta_{\text{dzone}} = 0$.

Коэффициенты штрафа критериев качества: $q_1 = 5$, $q_2 = 10$, $q_3 = 1000$, $q_4 = 10$, $q_5 = 0$, $r = 1$.

Замкнутая система с рассчитанными коэффициентами обратной связи имеет нулевую жесткость, т.е. $\vartheta_3 = 0$.

Осциллограммы углов рыскания, дрейфа, крена и угла отклонения аэроула системы с ПИД-регулятором и с робастным регулятором при номинальных параметрах (т.е. $\lambda = 1$) показаны на рисунке 3. Из графиков видно, что за две минуты оба регулятора приводят курсовой угол СВП в заданное положение ($\varphi_0 = 35$ град), при этом угол дрейфа не достигает критических значений приводимых к опрокидыванию, угол аэроула изменяется в конструктивно допустимых пределах.

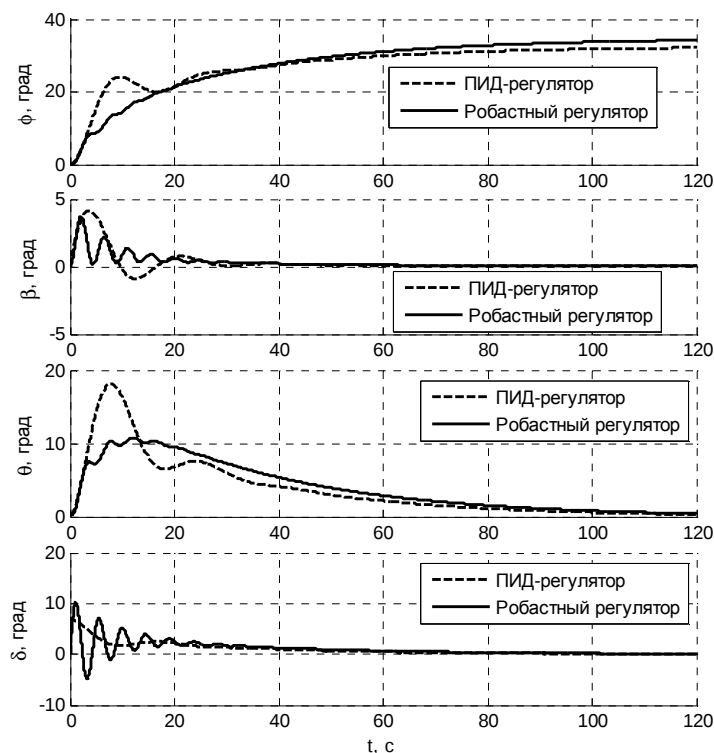


Рисунок 3 – Результати моделювання

Далее исследуются робастные свойства системы, для чего в программе моделирования выбирается значение неопределенности $\lambda = 100$. Такое изменение параметров модели на практике может соответствовать увеличению массы судна и т.п. Результаты моделирования системы с робастным регулятором и с ПИД-регулятором (регуляторы настроены по номинальным параметрам, без учета λ) показаны на рисунке 4, откуда видно, что робастный регулятор по-прежнему обеспечивает стабилизацию курсового угла (с перерегулированием примерно 16 %) и приемлемое значение дрейфа, а вот ПИД-регулятор уже не дает приемлемого качества стабилизации.

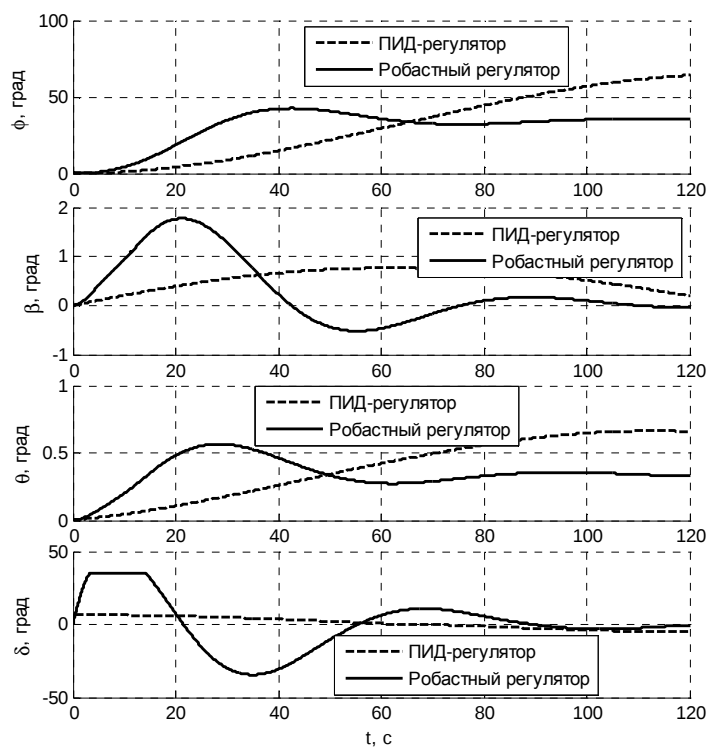


Рисунок 4 – Результати моделювання

Заключение. Робастный подход к задаче построения системы стабилизации бокового движения СВП позволяет синтезировать закон управления, обеспечивающий гарантированное качество процесса стабилизации при изменении параметров движения судна, которое может быть связано со спецификой функционирования, в частности, полезная нагрузка судна может существенно изменяться и, следовательно, будут изменяться и его параметры (масса, момент инерции). Показано, что использование классических ПИД-регуляторов в контуре стабилизации не дает гарантированного результата при наличии неопределенности.

Библиографический список использованной литературы

1. Скороходов Д.А. Системы управления движением кораблей с динамическими принципами поддержания / Д.А. Скороходов. — СПб: ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 2000. — 282 с.
2. Лукомский Ю.А. Навигация и управление движением судов / Ю.А. Лукомский, В.Г. Пешехонов, Д.А. Скороходов. — СПб.: Элмор, 2002. — 350 с.
3. Смирнов С.А. Суда на воздушной подушке скегового типа / С.А. Смирнов. — Л.: Судостроение, 1983. — 216 с.
4. Кабанов А.А. Мера устойчивости к сингулярным возмущениям и робастные свойства линейных систем / А.А. Кабанов, С.А. Дубовик // Проблемы управления и информатики. — 2010. — Вып. 3. — С. 17–28.
5. Kokotovic P.V. Two-time-scale feedback design of a class of nonlinear systems / P.V. Kokotovic, J. Chow // IEEE Trans. on Automatic Control. — 1978. — Vol. 23. — P. 438–443.
6. Кетков Ю.Л. MATLAB 7: программирование, численные методы / Ю.Л. Кетков, А.Ю. Кетков, М.М. Шульц. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 752 с.

Поступила в редакцию 10.10.2011 г.

Кабанов О.О. Робастна стабілізація бічного руху судна на повітряній подушці

Синтезовано систему робастної стабілізації бічного руху судна на повітряній подушці, основу на сингулярно збуреному опису невизначеності у параметрах системи. Показник робастності визначається на основі оцінки жорсткості замкнутої системи. Наведено результати моделювання в системі Matlab.

Ключеві слова: робастність, робастна стабілізація, судно на повітряній подушці, жорсткість, сингулярне збурення.

Kabanov A.A. Robust stabilization of hovercraft lateral motion

The robust stabilizing system of hovercraft's lateral motion based on singular perturbation approach of uncertainty description is built. The robustness measure is defined under the hardness estimation of the closed-loop system. The results of modeling in Matlab are cited.

Keywords: robustness, robust stabilization, hovercraft, hardness, singular perturbation.