

УДК 62.50

Л.А. Краснодубец, профессор, д-р техн. наук,

М.А. Григоров, А.Е. Осадченко

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

ТЕРМИНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ УГЛОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ СУДОВ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

Исследуется подход для построения системы терминального управления угловым движением судна на воздушной подушке, который основан на решении обратной задачи динамики. При этом алгоритм терминального управления обеспечивает движение управляемой координаты по заданной траектории и приводит ее в заданное состояние за требуемое время. Моделирование показало, что предложенный алгоритм для цифрового регулятора обладает слабой чувствительностью к параметрическим и координатным возмущениям.

Судно на воздушной подушке (СВП) – относительно новый вид транспортного средства, использующего динамические принципы поддержания. Удержание корпуса СВП над опорной поверхностью происходит благодаря избыточному давлению в воздушной подушке, которое создают специальные вентиляторы. Продольное движение СВП обеспечивают воздушные винтовые движители, приводимые в действие газовыми турбинами. Угловое движение СВП выполняет с помощью аэродинамических рулей, располагаемых в потоке винтов. Так как СВП движется в воздухе, то в отличие от водоизмещающих судов оно обладает более высокой подвижностью при угловых движениях. Это приводит к тому, что при разворотах угол дрейфа (угол между вектором скорости и вертикальной плоскостью симметрии СВП) может достигать больших значений, что сопровождается сильным заносом судна, и следовательно, увеличением времени переходного процесса, а также повышенным расходом топлива.

Другой особенностью СВП является зависимость его динамических характеристик от вида опорной поверхности [1]. Это приводит к тому, что коэффициенты математической модели, описывающей его движение, скачкообразно изменяются, например, при переходе от одной опорной поверхности к другой.

Отмеченные особенности СВП не позволяют эффективно использовать для их управления традиционные регуляторы, так как последние нуждаются в перенастройке при изменении параметров управляемых объектов. По этой причине ставится актуальная задача конструирования новых законов управления для регуляторов, малочувствительных к изменению параметров и координатным возмущениям и предназначенных для управления СВП.

Известные системы управления, например, применяемые, на СВП типа «Зубр», используют пропорционально-дифференциальный закон управления в сочетании с дополнительной обратной связью по углу дрейфа для обеспечения режима стабилизации движения по путевому углу. Такое решение имеет ряд существенных недостатков, анализ которых приводится в [2], где предложен новый закон управления и соответствующий алгоритм для цифрового регулятора состояния. Однако и в этом случае параметры настройки регулятора в значительной степени определяются параметрами динамической модели СВП.

Целью статьи является исследование возможности применения терминального управления угловым движением СВП.

Перспективным в этом направлении является развитие метода синтеза терминальных управлений [3], основанного на решении обратной задачи динамики, применительно к цифровым системам. Задача терминального управления в рассматриваемом случае сводится к переводу объекта из начального состояния в назначенное за конечный интервал времени. При этом траектория и временной интервал движения задаются, а роль терминального регулятора сводится к тому, чтобы осуществить движение управляемого объекта по известной программе. Важное преимущество этого метода заключается в том, что параметры синтезированного терминального регулятора не зависят от параметров объекта управления. Это позволяет конструировать алгоритмы управления объектами, характеристики которых изменяются в процессе их эксплуатации. Применение законов терминального управления также открывает новые возможности для использования СВП, например, в случае, когда кильватерному строю кораблей, предписывается выполнить синхронный поворот «все вдруг» на заданный угол в течение требуемого времени.

Рассмотренный подход к синтезу алгоритмов терминального управления предложен относительно недавно и, следовательно, ещё не исследован применительно ко многим задачам прикладного характера. При этом, как уже отмечалось, данный метод позволяет получить эффективный алгоритм управления, не

имея полной информации о коэффициентах модели объекта. Поэтому представляет интерес использование этого подхода для синтеза алгоритма управления СВП и исследование полученной системы терминального управления.

Поскольку специфические свойства СВП наиболее ярко проявляются при выполнении манёвров, связанных с разворотами, используется его математическая модель для углового движения (рыскания). При этом в качестве средства управления рассматривается вертикальный аэродинамический руль, характеризующийся углом перекладки δ_B .

При малых углах крена движение рыскания СВП характеризуется вектором состояния $x = [\varphi \ \omega \ \beta]$, где φ и ω соответственно угол рыскания и его производная, а β – угол дрейфа. Соответствующее уравнение состояния, описывающее угловое движение (рыскание) СВП, имеет вид [1]

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ b_{21} \\ b_{31} \end{bmatrix} \delta_B. \quad (1)$$

При определении числовых значений параметров модели (1) за основу взяты значения, приведенные в [1], влияние которых на динамику модели СВП исследовалось и значения уточнялись таким образом, чтобы собственные числа матрицы модели (1) соответствовали реальным значениям собственной частоты и времени затухания переходного процесса движения рыскания. Уточнённая модель СВП имеет три полюса: вещественный $p_1 = 0$, и два комплексно-сопряженных $p_{2,3} = -\alpha \pm j\omega = -0,0208 \pm j 0,1772$. Время затухания переходного процесса, равное $3/\alpha$, составляет 144 с, а период колебаний, $T = 2\pi/\omega = 15$ с.

Строго говоря, к уравнению объекта (1) необходимо добавить уравнение рулевого тракта, преобразующего управляющий электрический сигнал $u(t)$ в угол перекладки аэродинамического руля $\delta_B(t)$. Однако для упрощения решения задачи представляется возможным принять $\delta_B(t) = u(t)$.

На управление накладываются ограничения, вызванные конструктивными особенностями аэрорулей $-30^\circ \leq \delta_B(t) \leq +30^\circ$.

Преобразуем векторно-матричное уравнение (1) к дифференциальному относительно управляемой координаты $\varphi(t)$. Имеем

$$\ddot{\varphi}(t) - 0,042\ddot{\varphi}(t) + 0,032\dot{\varphi}(t) = 0,313\dot{u}(t) + 0,055u(t). \quad (2)$$

Такой переход необходим для применения метода конструирования функции терминального управления на основе решения обратной задачи динамики.

Для уравнения (2) зададим граничные условия

$$\varphi^{(s)}(0) = \varphi_0^{(s)}, \quad \varphi^{(s)}(T) = \varphi_T^{(s)}, \quad s = 0, 1, 2,$$

где T – заданный момент времени, которому соответствует терминальное состояние системы.

$$\text{Для определённости примем } \varphi_0^{(i)} = 0, \quad i = 0, 1, 2; \quad \varphi_T = \frac{\pi}{2}, \quad \dot{\varphi}_T = 0, \quad \ddot{\varphi}_T = 0.$$

Выбранные граничные условия, соответствует повороту СВП на 90° . Траектория $y(t)$ перехода

системы в назначенное состояние может быть представлена в виде полинома $y(t) = \sum_{k=0}^5 \gamma_k t^k$, где

коэффициенты γ_k однозначно определяются с помощью выбранных граничных условий.

Из граничных условий для левого конца траектории ($t=0$) находим

$$y(0) = \gamma_0 = \varphi_0 = 0, \quad \dot{y}(0) = \gamma_1 = \dot{\varphi}_0 = 0, \quad \ddot{y}(0) = \gamma_2 = \ddot{\varphi}_0 = 0.$$

Для правого конца траектории ($t=T$) с учётом уже найденных первых трёх коэффициентов γ_k можно получить остальные:

$$\begin{bmatrix} \gamma_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^3 & T^4 & T^5 \\ 3T^2 & 4T^3 & 5T^4 \\ 6T & 12T^2 & 20T^3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\pi}{2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

На динамику отклонения $\delta(t) = y(t) - \varphi(t)$ движения (2) от заданной траектории, вызванного возможными возмущениями, наложим требование

$$\ddot{\delta}(t) + h_2 \ddot{\delta}(t) + h_1 \dot{\delta}(t) + h_0 \delta(t) = 0, \quad (3)$$

где коэффициенты h_i выбираются так, чтобы процесс (3) при ненулевых начальных условиях $\delta^{(i)}(0)$, $i = 0, 1, 2$ затухал за время, на порядок меньшее времени терминального управления. Вычисление коэффициентов h_i выполним методом параметрической оптимизации, используя средства среды

визуального моделирования Simulink из программного комплекса Matlab в блоке NCD Outport. В результате параметрической оптимизации по критерию (заданному времени переходного процесса), равному 10 с, найдены искомые параметры: $h_0 = 0,9991$; $h_1 = 2,2872$; $h_2 = 1,6642$.

Следуя методике [3], выразим из уравнения (3) требуемое значение производной $\ddot{\varphi}^*(t)$.

$$\ddot{\varphi}^* = \ddot{y} + \sum_{i=0}^2 h_i (y^{(i)} - \varphi^{(i)}).$$

Производную управляющей функции $\dot{u}(t)$ определим из условия минимума функционала (4)

$$G(\dot{u}) = \frac{1}{2} [\dot{\varphi}^*(t) - \ddot{\varphi}(t, \dot{u})]^2. \quad (4)$$

Если движение к минимуму функционала (4) осуществлять по градиентной схеме первого порядка, то скорость изменения варьируемой функции $\dot{u}$ определится дифференциальным соотношением

$$\frac{d\dot{u}(t)}{dt} = -\lambda \frac{dG(\dot{u})}{d\dot{u}}, \quad \lambda = \text{const}. \quad (5)$$

С учётом (2) выражение для производной градиента по переменной $\dot{u}$ имеет вид

$$\frac{dG(\dot{u})}{d\dot{u}} = -0.313(\ddot{\varphi}^* - \ddot{\varphi}). \quad (6)$$

Подстановка (6) в (5) приводит к дифференциальному закону управления

$$\ddot{u} = k(\ddot{\varphi}^* - \ddot{\varphi}), \quad (7)$$

где $k = 0,313\lambda$.

Двойное интегрирование (7) по времени при нулевых начальных значениях переменных даёт уравнения искомого алгоритма терминального управления СВП:

$$\begin{aligned} u(t) &= k(\dot{\varphi}^*(t) - \dot{\varphi}(t)), \\ \dot{\varphi}^*(t) &= \dot{y}(t) + h_0 f_1(t) + h_1 f_0(t) + h_2 (y(t) - \varphi(t)), \\ f_0(t) &= \int_0^t (y(\tau) - \varphi(\tau)) d\tau, \quad f_1(t) = \int_0^t f_0(\tau) d\tau. \end{aligned} \quad (8)$$

Для устойчивости локального контура управления, описываемого уравнениями (8), необходимо и достаточно, чтобы $k > 0$. Для устойчивости же системы в целом требуется, чтобы $k \gg 1$.

Функциональная схема замкнутой системы терминального управления, изображенная на рисунке 1, содержит три блока: блок формирования требуемой траектории движения (ТТД) $y(t)$ и её производных, блок регулятора, реализующего закон управления (8), и блок объекта управления – СВП, описываемого уравнением (2).

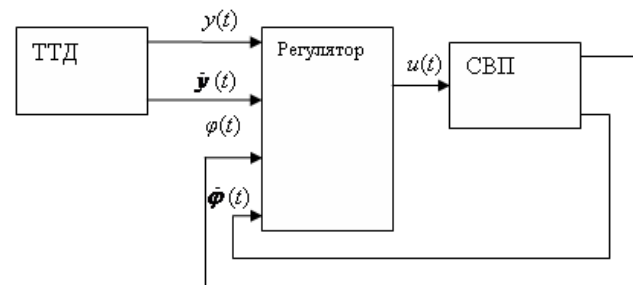


Рисунок 1 – Функциональная схема замкнутой системы терминального управления СВП

Построим алгоритм для цифрового регулятора системы терминального управления угловым положением СВП на основе его аналогового прототипа (8). Для этой цели воспользуемся процедурой преобразования аналоговых моделей в дискретные, принадлежащей Тастину [4]. Суть этого метода состоит в записи непрерывной модели (или структурной схемы), содержащей только интеграторы и коэффициенты передачи, и последующей замене непрерывных интеграторов дискретными при сохранении неизменными значений коэффициентов передачи непрерывной модели. При этом частота квантования дискретной системы должна быть не менее чем в 15 раз выше основной частоты

исследуемой непрерывной системы. Если последнее условие выполняется, то коэффициенты h_i , вычисленные для непрерывной системы, можно сохранить и для дискретной. Однако рекомендуется эти коэффициенты, выступающие в роли параметров настройки цифрового регулятора, вычислять методом решения конечно-разностного уравнения, полученного на основе дискретизации уравнения (3), при заданном периоде дискретизации. Структура цифрового терминального регулятора, построенная методом Тастина, показана на рисунке 2.

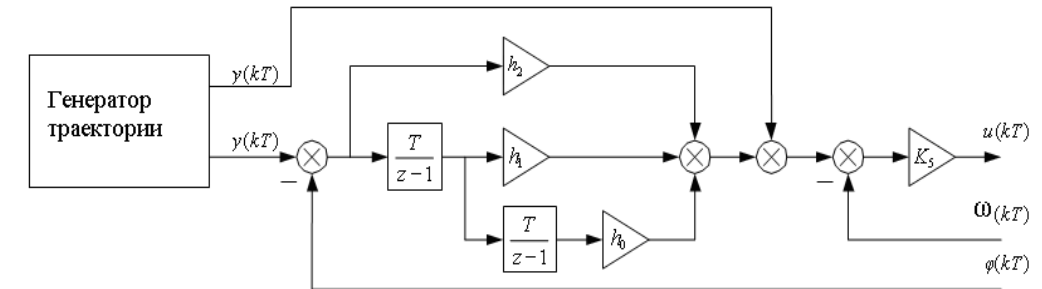


Рисунок 2 – Структурная схема цифрового терминального регулятора

Исследование замкнутой системы терминального управления угловым движением СВП в горизонтальной плоскости выполнено в среде визуального моделирования Simulink. Период дискретизации цифровой модели системы, определяемый периодом дискретизации цифровых интеграторов, принят равным 0,1 с, что соответствует возможностям современных контроллеров (например, изделиям Shneider Electric типа Premium), применяемым для управления подвижными объектами.

С целью проверки влияния на качество управления ненулевых начальных условий и скачкообразного изменения параметров СВП во время его управляемого разворота на 90° для угла рыскания в цифровой модели задавалось начальное значение $\varphi(0) = -2^\circ$, а также в процессе моделирования скачкообразно изменялось значение коэффициента a_{23} матрицы (1) модели движения СВП. Результаты моделирования приведены на рисунке 3. Сплошной линией обозначена траектория изменения переменной $\varphi(t)$ – угла рыскания, а штриховой линией обозначена траектория изменения путевого угла $\sigma(t) = \varphi(t) - \beta(t)$.

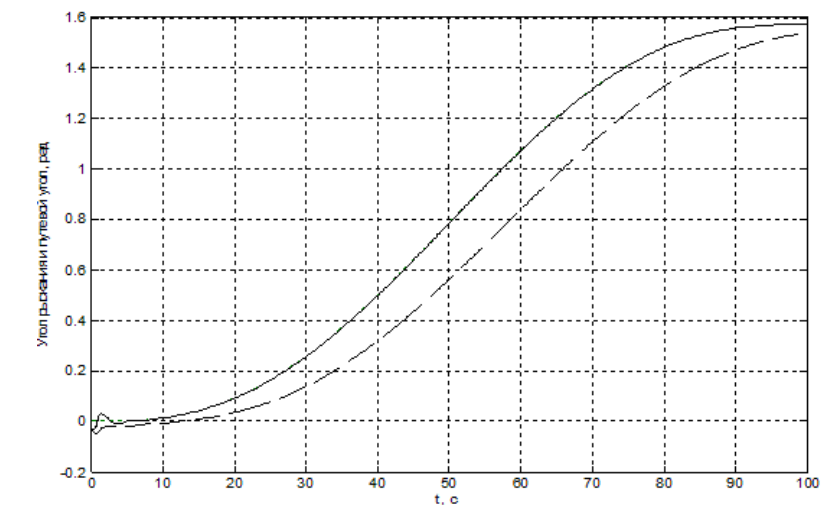


Рисунок 3 – Графики процессов в системе терминального управления СВП с цифровым регулятором

Результаты моделирования показали, что система терминального управления угловым движением СВП с цифровым регулятором (период дискретизации $T = 0,1$ с) подавляет начальные отклонения в управляемой координате до $\pm 4^\circ$ от принятых при расчётах. При скачкообразном изменении в несколько раз параметров СВП, зависящих от подстилающей поверхности (при переходе с воды на лед), сохраняет своё движение к терминальному состоянию. При этом управляемая координата с высокой точностью следует по назначенной траектории. Кроме того, за всё время терминального управления угол дрейфа

$\beta(t)$ принимает значения в пределах $\pm 0,16$ рад, а в конечный момент времени управления дрейф и вовсе отсутствует.

Дальнейшее направление исследований может быть связано с разработкой рекомендаций по выбору параметра λ , входящего в соотношение (5), и построением алгоритмического и программного обеспечений синтеза терминальных регуляторов для СВП.

Библиографический список

1. Скороходов Д.А. Навигация и управление движением судов / Д.А. Скороходов, Ю.А. Лукомский, В.Г. Пешехонов. — СПб.: Изд-во “Элмор”, 2002. — 340 с.
2. Краснодубец Л.А. Модификация алгоритма управления для САУ кораблем на воздушной подушке / Л.А. Краснодубец, Е.П. Николаенко, А.Е. Осадченко // Сб. науч. тр. Севастопольского военно-морского института им. П.С. Нахимова. — Севастополь, 2005. — Вып. 2(8). — С. 225–231.
3. Крутько П.Д. Алгоритмы терминального управления линейными динамическими системами П.Д. Крутько // Известия РАН. — 1998. — Вып. 6. — С. 33–45.
4. Смит Дж.М. Математическое и цифровое моделирование для инженеров и исследователей / Дж.М. Смит. — М.: Машиностроение, 1980. — 271 с.

Поступила в редакцию 13.12.2006 г.