

УДК 62-50

А.Е. Осадченко, ст. преподаватель кафедры ТК*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: tk@sevtu.sebastopol.ua***ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УГЛОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ**

Исследуется подход для построения цифровой системы управления угловым движением транс портных средств на воздушной подушке, который основан на решении обратной задачи динамики. При этом алгоритм управления обеспечивает движение управляемой координаты по заданной траектории и приводит ее в заданное состояние за требуемое время.

Приведены результаты моделирования в среде SIMULINK.

Ключевые слова: транспортное средство на воздушной подушке, управление угловым движением, обратная задача динамики.

Транспортные средства на воздушной подушке (ТСВП) благодаря своим уникальным особенностям являются перспективным средством для проведения десантных и спасательных операций в условиях мелководья и необорудованного берега. Следует отметить возможность преодоления ТСВП невысоких препятствий и отсутствие для них сезонных ограничений. ТСВП могут иметь высокую скорость при сохранении качеств водоизмещающих судов (грузоподъемность, мореходность).

Управление движением ТСВП имеет некоторые особенности. Так как ТСВП 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 ТСВП) может достигать больших значений, что сопровождается сильным заносом судна, и, следовательно, увеличением времени переходного процесса, а также повышенным расходом топлива.

Другой особенностью ТСВП является зависимость его динамических характеристик от вида опорной поверхности [1]. Известные системы управления, например, применяемые, на ТСВП типа «Зубр», используют пропорционально-дифференциальный закон управления в сочетании с дополнительной обратной связью по углу дрейфа для обеспечения режима стабилизации движения по путевому углу. Однако в этом случае параметры настройки регулятора в значительной степени определяются параметрами динамической модели ТСВП. По этой причине ставится актуальная задача конструирования новых законов управления для регуляторов, малочувствительных к изменению параметров и координатным возмущениям и предназначенных для управления ТСВП.

Предлагается развитие метода синтеза терминальных управлений [2], основанного на решении обратной задачи динамики. 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 [3].

Целью настоящей работы является синтез алгоритма угловым движением ТСВП, преобразование регулятора к цифровому виду, исследование свойств спроектированного регулятора посредством моделирования системы управления угловым движением ТСВП.

1. Синтез алгоритма управления угловым движением ТСВП

Поскольку специфические свойства ТСВП 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_A .

При малых углах крена движение рыскания ТСВП 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) ТСВП, имеет вид [1]

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

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

Рассмотрим метод синтеза алгоритмов терминального управления для модели одномерного объекта. Пусть движение управляемого объекта описывается уравнением

$$\ddot{x} + a_2\dot{x} + a_1x + a_0x = b_1\dot{u} + b_0u \quad (2)$$

где x – управляемая координата, u – управляющая функция, которая может принимать значения в заданных пределах $u^- \leq u \leq u^+$.

Относительно модели объекта (2) должно выполняться условие: $b_0/b_1 > 0$.

В начальный момент времени $t = 0$ состояние объекта определяется значениями:

$$x^{(i)}(0) = x_0^{(i)}, i = 0, 1, 2. \quad (3)$$

Требуется обеспечить перевод системы в терминальное состояние,

$$x^{(i)}(T) = x_T^{(i)}, i = 0, 1, 2. \quad (4)$$

соответствующее моменту времени $t = T$, где T – время терминального управления.

Рассматриваемый метод предусматривает последовательное решение двух взаимосвязанных задач с целью синтеза алгоритмов терминального управления.

Первая задача состоит в задании требуемого поведения объекта во время управления. Требуемое поведение объекта управления $y(t)$ формулируется в виде линейной комбинации известных линейно независимых аналитических функций ψ_j

$$y(t) = \sum_{i=0}^5 c_i \psi_i(t). \quad (5)$$

Постоянные коэффициенты c_i определяются из условий

$$y^{(i)}(0) = x_0^{(i)}, y^{(i)}(T) = x_T^{(i)}, i = 0, 1, 2. \quad (6)$$

Подставляя (5) в (6) получаем систему линейных алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} y^{(i)}(0) &= \sum_{j=0}^5 c_j \psi_j^{(i)}(0), \quad i = 0, 1, 2 \\ y^{(i)}(T) &= \sum_{j=0}^5 c_j \psi_j^{(i)}(T), \quad i = 0, 1, 2 \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, количество слагаемых в выражении (5) выбирается так, чтобы все коэффициенты c_j могли быть однозначно определены по заданным граничным условиям[3].

Вторая задача, заключается в конструировании собственно алгоритма управления, обеспечивающего перевод объекта в терминальное состояние по выбранной траектории. Для этого, прежде всего, вводится функция, характеризующая динамику отклонения движения объекта от заданной траектории, $\delta(t) = y(t) - x(t)$, и на эту функцию накладывается требование в виде дифференциального уравнения

$$\ddot{\delta}(t) + h_2\dot{\delta}(t) + h_1\delta(t) + h_0\delta(t) = 0, \quad (8)$$

где коэффициенты h_i выбираются так, чтобы процесс (8) при ненулевых начальных условиях $\delta^{(i)}(0), i = 0, 1, 2$ затухал за время, на порядок меньшее времени управления.

Из уравнения (2) следует, что изменение, какого либо из параметров объекта, а также влияние внешних сил приводит к отклонению текущего ускорения \ddot{x} от требуемого ускорения \ddot{x}^* , которое можно найти из уравнения (8). Предлагается, поиск эффективного алгоритма управления провести путем минимизации функции

$$G(u) = \frac{1}{2} [\dot{x}^*(t) - \ddot{x}(t, u)]^2. \quad (9)$$

Таким образом, решение поставленной задачи – нахождение управляющих функций $u(t)$ выполним исходя из требования, чтобы на траекториях управляемого движения значения критерия (9) в каждый момент времени принадлежали малой окрестности их минимума.

Решение этой обратной задачи динамики для непрерывной системы предлагается выполнять путем минимизации (9) градиентным методом, предложенным в [2], где искомое управление находится из решения дифференциального уравнения

$$\frac{du(t)}{dt} = -\lambda \frac{\partial G(u)}{\partial u}, \quad (10)$$

где λ – параметр, характеризующий скорость приближения управляющих функций $u(t)$ к ее оптимальному значению.

Если алгоритм (10) реализуется на базе микроконтроллера, работающего с периодом дискретизации τ , то управляющий сигнал на его выходе будет представляться в виде ступенчатой функции, сохраняющей свое значение постоянным в течение всего периода τ , что позволяет переписать соотношение (10) в виде

$$\frac{u[(k+1)\tau] - u[k\tau]}{\tau} = -\lambda \frac{\partial G(u)}{\partial u}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, u = u(k\tau), \lambda = const$$

и получить конечно-разностное уравнение, удобное для реализации на микроконтроллерах

$$u[(k+1)\tau] = u[k\tau] - \tau\lambda \frac{\partial G(u)}{\partial u}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, u = u(k\tau), \lambda = const. \quad (11)$$

Уравнение (11) определяет итерационную процедуру вычисления оптимального управления $u(t)_{opt}$ по критерию (9). Параметр λ в (11) определяет размер шага, остающегося постоянным во время всей итерационной процедуры и который можно рассматривать как коэффициент, определяющий устойчивость и скорость сходимости итерационного процесса при вычислении оптимального управления $u(t)_{opt}$.

Для решения уравнения (11), которое является уравнением регулятора, необходимо найти производную $\frac{\partial G(u)}{\partial u}$ и выбрать параметр λ .

Для вычисления производной найдем из (8) требуемые значения \ddot{x}^* и подставим их в функцию качества (9), получим

$$G(u) = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{h_2} (\ddot{y} - \ddot{x} + h_2 \dot{y} + h_1 (\dot{y} - \dot{x}) + h_0 (y - x) - \ddot{x}(t, u)) \right]^2, \quad t \geq 0, \quad (12)$$

где $u = u(k\tau)$, при $k\tau \leq t < (k+1)\tau, k = 0, 1, 2, \dots$

Дифференцируя обе части (12) по u с учетом (2) найдем

$$\frac{\partial G(u)}{\partial u} = -\frac{b_0}{h_2} [(\ddot{y} - \ddot{x} + h_2 \dot{y} + h_1 (\dot{y} - \dot{x}) + h_0 (y - x) - \ddot{x})], \quad (13)$$

где $u = u(k\tau)$, при $k\tau \leq t < (k+1)\tau, k = 0, 1, 2, \dots$

Подставляя (13) в правую часть (11) получаем рекуррентное соотношение в форме конечно-разностного уравнения

$$u[(k+1)\tau] = u[k\tau] + K [(\ddot{y} - \ddot{x} + h_2 \dot{y} + h_1 (\dot{y} - \dot{x}) + h_0 (y - x) - \ddot{x})], \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (14)$$

где $K = \tau\lambda \frac{b_0}{h_2}$.

Из (14) следует, что ступенчатый управляющий сигнал вычисляется на основе информации о текущем состоянии непрерывного объекта, который характеризуется информацией об угловой координате ТСВП, угловой скорости, угловом ускорении ТСВП и третьей производной угловой координаты при $k\tau \leq t < (k+1)\tau, k = 0, 1, 2, \dots$

Так как информация поступает в микроконтроллер дискретно во времени и в цифровой форме, уравнение (14) можно преобразовать к виду, определяющему дискретный закон управления непрерывным объектом

$$u[(k+1)\tau] = u[k\tau] + KE(k\tau), \quad (15)$$

где $E(k\tau) = \ddot{y}(k\tau) - \ddot{x}(k\tau) + h_2\dot{y}(k\tau) + h_1(\dot{y}(k\tau) - \dot{x}(k\tau)) + h_0(y(k\tau) - x(k\tau)) - \ddot{x}(k\tau)$, $k\tau \leq t < (k+1)\tau, k = 0, 1, 2, \dots$

Начальные условия для конечно-разностного уравнения (15) определяются при $k = 0$ начальными значениями функции $E(k\tau)$ и начальным значением управляющей функции $u(0) = u_0$.

Структурная схема цифрового терминального регулятора, реализующего сконструированный дискретный закон терминального управления в форме (15) приведена на рисунке 1. Блоки “Zero-Order Hold” содержащие ключи, замыкающиеся с периодом τ и запоминающее устройство, выполняют функцию экстраполятора нулевого порядка. Блок “Delay” осуществляет задержку на τ .

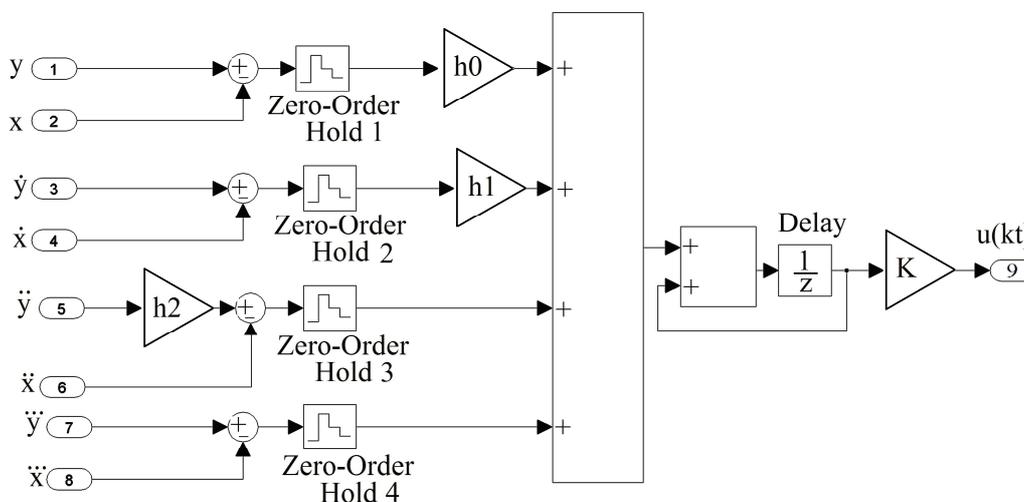


Рисунок 1 – Структурная схема цифрового регулятора, обеспечивающего угловое движение ТСВП

Для технической реализации адаптивного регулятора необходимо выбрать коэффициенты h_0, h_1, h_2 и $K = \tau\lambda \frac{b_0}{h_2}$. Коэффициенты h_0, h_1, h_2 , выступающие в роли параметров настройки цифрового регулятора, можно вычислить методом решения конечно-разностного уравнения, полученного на основе дискретизации уравнения (8), при заданном периоде дискретизации. Коэффициент K выбирается на этапе настройки терминального регулятора.

2. Моделирование цифровой системы управления угловым движением ТСВП

Замкнутая система терминального управления, должна содержать три блока: блок формирования требуемой траектории движения $y(t)$ и её производных, блок цифрового регулятора, реализующего закон управления (15), и блок объекта управления – СВП, описываемого уравнением (1).

Анализ разностного уравнения (15) позволяет сделать вывод о том, что блок формирования требуемой траектории должен выдавать информацию о требуемой координате $y(t)$ и первых трех ее производных $\dot{y}(t), \ddot{y}(t), \ddot{\ddot{y}}(t)$.

В соответствии с требованиями (3) и (4) функция, определяющая требуемую траекторию $y(t)$, может быть получена с помощью полинома

$$y(t) = \sum_{k=0}^5 c_k t^k, \quad (16)$$

а затем могут быть найдены ее производные.

Коефіцієнти полинома c_k однозначно определяются с помощью выбранных начальных $\varphi_0, \dot{\varphi}_0, \ddot{\varphi}_0$, конечных $\varphi_T, \dot{\varphi}_T, \ddot{\varphi}_T$ граничных условий и временем терминального управления T , решением системы линейных уравнений (17).

$$\begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2 & T^3 & T^4 & T^5 \\ 0 & 1 & 2T & 3T^2 & 4T^3 & 5T^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6T & 12T^2 & 20T^3 \\ 1 & T & T^2 & T^3 & T^4 & T^5 \\ 0 & 1 & 2T & 3T^2 & 4T^3 & 5T^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6T & 12T^2 & 20T^3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \varphi_0 \\ \dot{\varphi}_0 \\ \ddot{\varphi}_0 \\ \varphi_T \\ \dot{\varphi}_T \\ \ddot{\varphi}_T \end{bmatrix}. \tag{17}$$

Моделирование производилось при помощи средств пакета инженерных прикладных программ MATLAB, а именно Simulink Response Optimization.

При определении числовых значений параметров модели (1) за основу взяты значения приведенные в [3].

При этом уравнение (1) с числовыми коэффициентами имеет следующий вид

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.143 & -0.059 \\ 0 & 1 & -0.185 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.313 \\ 0.052 \end{bmatrix} u \tag{18}$$

Модель (18) имеет один нулевой полюс и два комплексно-сопряжённых. Время затухания переходного процесса, составляет 143 с, а период колебаний 35 с.

Для моделирования приняты начальные $\varphi_0 = 0, \dot{\varphi}_0 = 0, \ddot{\varphi}_0 = 0$, конечные условия $\varphi_T = \pi/2, \dot{\varphi}_T = 0, \ddot{\varphi}_T = 0$ и время терминального управления $T = 100c$, что соответствует повороту ТСВП на 90° за время T . Вследствие чего, коэффициенты h_0, h_1, h_2 необходимо было выбрать так, чтобы процесс (8) при ненулевых начальных условиях $\delta^{(i)}(0), i = 0,1,2$ затухал за время не более $T/10 = 10c$.

Вычисление коэффициентов h_0, h_1, h_2 было выполнено методом параметрической оптимизации, используя средства среды визуального моделирования Simulink из программного комплекса Matlab в блоке Signal Constraint. Для этого уравнение (8) представлено в виде разностного уравнения. Вместо задания ненулевых начальных условий на вход схемы подано единичное воздействие. Схема моделирования дифференциального уравнения (8) для $\delta(t)$ в среде SIMULINK изображена на рисунке 2, начальные значения были приняты: $h_0 = 1, h_1 = 1, h_2 = 1$, время дискретизации $\tau = 0,3$ с, было выбрано из требования для дискретных систем $\tau < T_{Tr} / 10$, где $T_{Tr} = 10$ с время затухания переходного процесса.

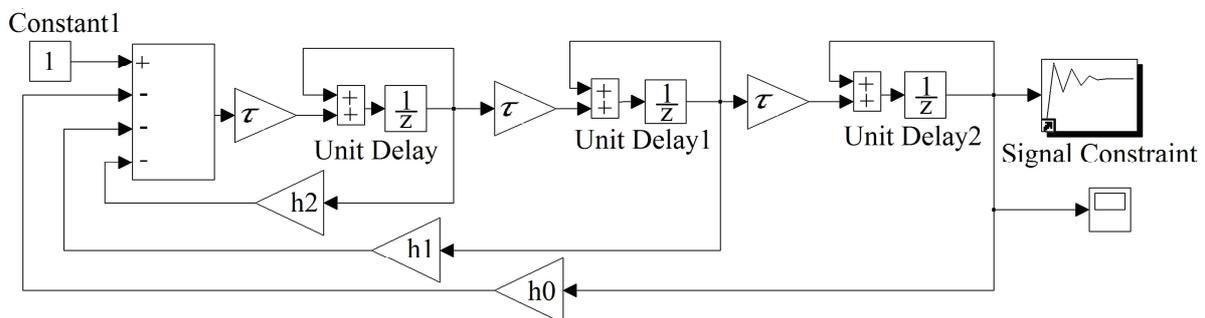


Рисунок 2 – Схема моделирования дифференциального уравнения для $\delta(t)$ в среде SIMULINK

В результате параметрической оптимизации по критерию (заданному времени переходного процесса), равному 10 с, найдены искомые параметры: $h_0 = 0.9982, h_1 = 2.8281, h_2 = 1.9172$. Коэффициент усиления регулятора был выбран $k = 2$.

Схема моделирования углов рысканья и дрейфа ТСВП в среде SIMULINK в соответствии с (2) изображена на рисунке 3.

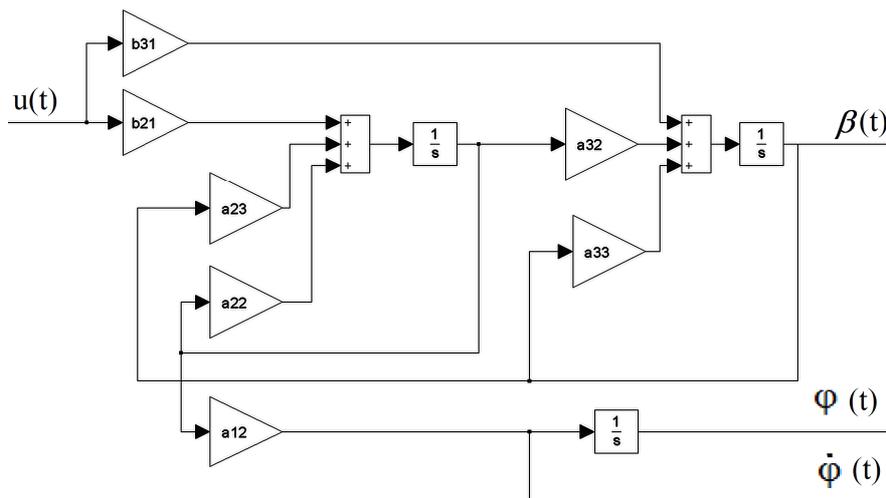


Рисунок 3 – Структурная схема моделирования углов рысканья и дрейфа ТСВП

Схема моделирования замкнутой системы управления угловым движением ТСВП в среде SIMULINK изображена на рисунке 4.

Блок “Trajectory Generator” на структурной схеме выдает значения требуемой траектории $y(t)$ в соответствии с (16) и ее производных. Блок “Regulator” выполнен в соответствии со структурной схемой приведенной на рисунке 1. Блок “ТСВП” представляет собой модель бокового движения ТСВП в соответствии с уравнением (1). Предусмотрена возможность в процессе моделирования вносить возмущающие воздействия и менять параметры модели. Также большой практический интерес представляет поведение угла дрейфа $\beta(t)$ в системе, так как эта величина позволяет учесть не только угловое положение корабля, но и направление вектора скорости.

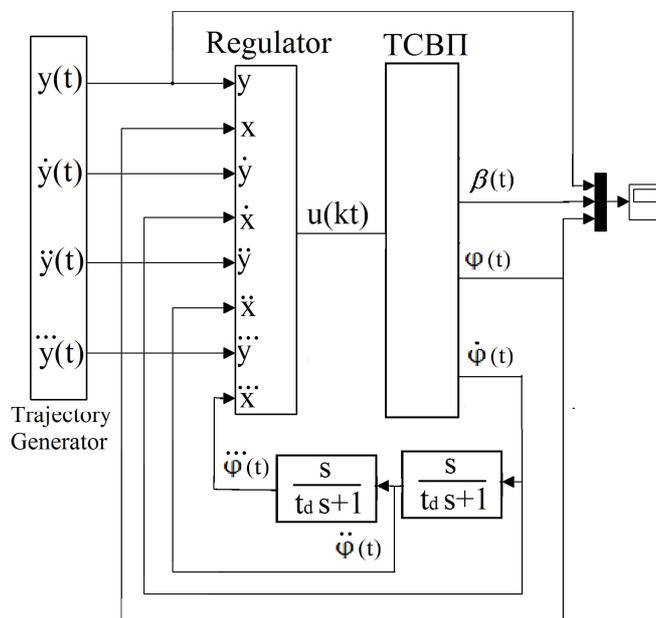


Рисунок 4 – Структурная схема моделирования замкнутой системы управления угловым движением ТСВП в среде SIMULINK

Так как в исходной системе отсутствует информация об угловом ускорении и третьей производной угла рыскания, то для получения необходимой информации были использованы два реальных дифференцирующих звена с постоянными времени t_D , равными периоду дискретизации τ .

Результаты моделирования при отсутствии возмущений показали полное совпадение графика входного сигнала $y(t)$ и угла рыскания $\varphi(t)$ на выходе системы, при этом угол дрейфа за время управления не превышает 0,16 рад, а в конечный момент времени ($t = T$) практически равен нулю.

Моделирование при наличии возмущения, в виде ненулевого начального значения угла рыскания $\varphi(0) = -0.07 \text{ рад}$, показало, что за относительно короткое время переходного процесса система подавляет это значительное возмущение, и далее все процессы протекают так же, как в системе без возмущений. Колебания угла рыскания и угла дрейфа практически затухают, за время меньше 10 с, после начала управления и в дальнейшем угол рыскания совпадает с заданным, так же как и в системе без начальных возмущений.

Для исследования чувствительности системы к изменению коэффициентов модели (1) производилось изменение коэффициентов a_{23} и a_{22} в процессе моделирования, что соответствует изменению типа подстилающей поверхности (вода и лед). Производилось увеличение в 7 раз значения коэффициента a_{23} длительностью 5 с начиная с 40 секунды терминального управления. При этом два ненулевых полюса модели (1) принимали комплексно сопряженные значения, а собственная частота переходного процесса движения рыскания, увеличивалась относительно исходной в 2,5 раза.

Результаты моделирования показаны в виде графиков входного сигнала системы $y(t)$, угла рыскания $\varphi(t)$ и угла дрейфа $\beta(t)$ на рисунке 5.

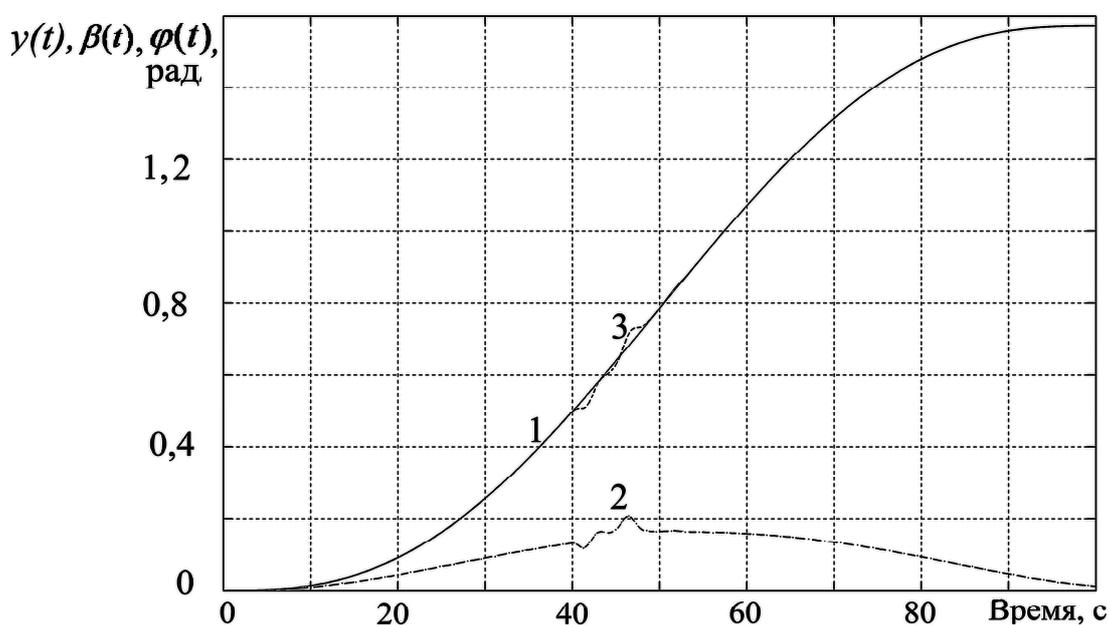


Рисунок 5 – Результаты моделирования бокового движения ТСВП при изменении вида подстилающей поверхности: 1 – требуемая траектория $y(t)$; 2 – угол дрейфа $\beta(t)$; 3 – угол рыскания $\varphi(t)$

Несмотря на значительное изменение параметров модели, угол рыскания практически совпадает с заданным. Увеличивается максимальное значение угла дрейфа, по сравнению с максимальным значением угла дрейфа при исходных параметрах модели, но после восстановления параметров модели к исходным величина дрейфа за время не более 5с становится практически равной углу дрейфа в исходной системе.

Для исследования чувствительности системы к внешним возмущениям в процессе моделирования на 60 секунде вводилось возмущающее воздействие в виде дополнительного вращательного момента, действующего на ТСВП в горизонтальной плоскости, в течение 10 с. Такой момент может возникнуть при уменьшении тяги одного из двигателей ТСВП.

Величина возмущения была выбрана равной максимальному вращательному моменту, возникающему во время работы системы терминального управления без возмущений, что соответствует увеличению тяги одного из движителей на 100 %.

На рисунке 6 показан график изменения угловой скорости ТСВП во время терминального управления с внешним возмущением.

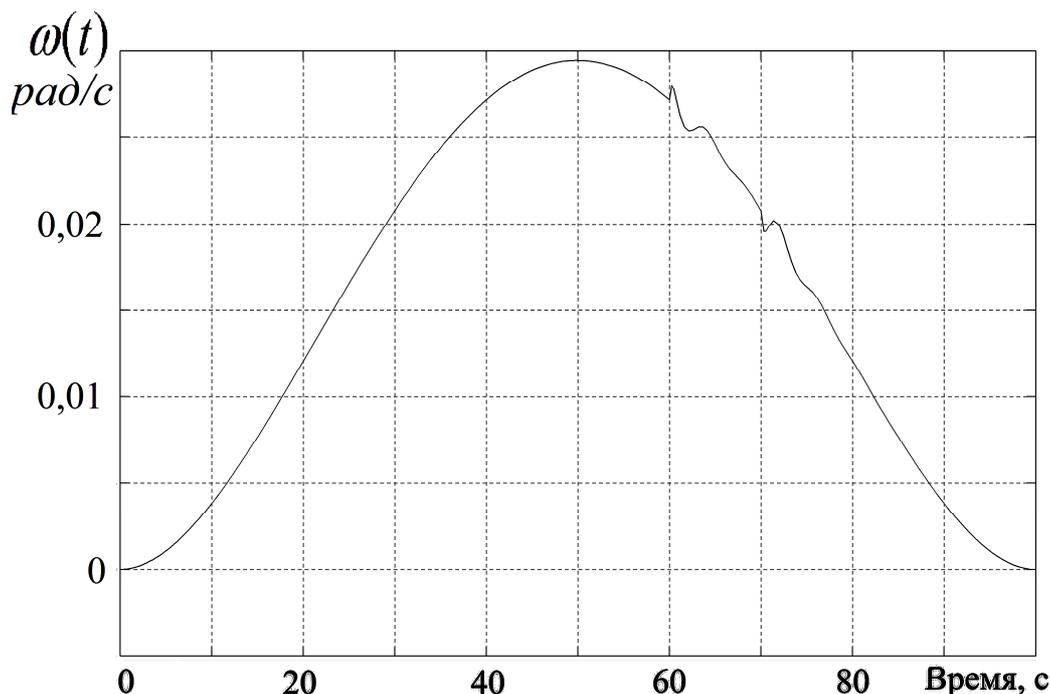


Рисунок 6 – Результати моделювання кулової швидкості ТСВП при наявності збурюючого моменту

Можно сделать вывод о том, что возмущающий момент вызвал незначительное изменение угловой скорости в течение нескольких секунд после начала и после окончания возмущающего воздействия. Система терминального управления быстро подавляет значительные возмущения в виде вращательного момента. При этом значения угла рыскания, путевого угла и угла дрейфа на выходе системы практически неотличимы от приведенных на рисунке 4 для системы без возмущений.

Заключення

Метод конструювання закону управління, оснований на розв'язанні оберненої задачі динаміки і локальної оптимізації, дозволяє побудувати термінальну систему управління куловим рухом ТСВП. При цьому алгоритм термінального управління забезпечує рух управляємої координати по заданній траєкторії і приводить її в задане стані за потрібне час.

Параметри спроектованого цифрового термінального регулятора мають малу залежність від параметрів об'єкта управління і можуть бути задані заздалегідь, що дозволяє конструювати алгоритми управління об'єктами, характеристики яких заздалегідь не відомі.

Дослідження спроектованої цифрової системи управління куловим рухом ТСВП в горизонтальній площині, показало її здатність ефективно подавляти початкові розголювання в управляємої координаті і вплив зовнішніх збурюючих сил при різних початкових умовах, параметричних і координатних збурюваннях.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Скороходов Д.А. Навігація і управління рухом судів / Д.А. Скороходов, Ю.А. Лукомський, В.Г. Пешехонов. — СПб.: Вид-во "Елмор", 2002. — 340 с.
2. Крутько П.Д. Алгоритми термінального управління лінійними динамічними системами П.Д. Крутько // Известия РАН. — 1998. — Вип. 6. — С. 33–45.
3. Краснодубец Л.А. Термінальне управління куловим рухом судів на повітряній подушці. / Л.А. Краснодубец, Е.П., М.А. Григоров, А.Е. Осадченко // Вестник СевНТУ. Сер. Автоматизація процесів і управління: сб. науч. тр. — Севастополь: СевНТУ, 2007. — Вип. 83. — С. 17–21.

Поступила в редакцію 22.01.2014 г.

Осадченко О.Є. Цифрова система керування кутовим рухом транспортних засобів на повітряній подушці

Досліджується підхід для побудови цифрової системи управління кутовим рухом транспортних засобів на повітряній подушці, який заснований на рішенні зворотної задачі динаміки. При цьому алгоритм управління забезпечує рух керованої координати по заданій траєкторії і приводить її в заданий стан за необхідний час.

Наведено результати моделювання в середовищі SIMULINK.

Ключові слова: транспортний засіб на повітряній подушці, керування кутовим рухом, зворотна задача динаміки.

Osadchenko A. Digital control system of angular motion of hovercraft

We study the approach to build a digital control system angular motion of vehicles on the hovercraft, which is based on solving the inverse dynamics problem. In this case the control algorithm provides a controlled movement along a predetermined path coordinates and leads her to a given state in the required time. The results of simulation in SIMULINK.

Keywords: hovercraft, control angular motion, the inverse dynamics problem.