

УДК 62-50

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

В.В. Альчаков

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ТЕРМИНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРОФИЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОКЕАНСКОЙ СРЕДЫ

Выполнен синтез закона управления в соответствии с основополагающими идеями [1] применительно к цифровым системам. Предложен метод выбора параметров цифрового регулятора и разработан алгоритм для программной реализации синтезированного закона управления. Показано, что построенный итерационный алгоритм вычисления управляющего сигнала обладает свойством адаптивности. Приведены результаты моделирования.

Введение. Морские зонды применяются для профильных измерений и являются основными источниками данных о распределении физических свойств и химического состава воды по глубине, что позволяет определить структуру океанской среды. Информация о структурных свойствах океанов и морей используется для решения многих комплексных задач формирования прогнозов их состояния. Например, данные о вертикальном распределении скорости звука в воде, полученные для локальных морских районов, используются для построения прогнозов дальности действия корабельных гидроакустических средств в этих районах. В настоящее время для этих целей используются неуправляемые автономные морские зонды Исток-4 (Россия), Mark III, NBIS, AN/SSQ-53A (США), Guildline (Канада) и др., которые имеют одинаковый принцип действия [2]. Скорость звука в текущей точке рассчитывается по данным измерений температуры и солёности воды, а также гидростатического давления. Существенным недостатком указанных моделей является относительно высокая скорость погружения, которая в зависимости от плотности воды может существенно изменяться (1...5 м/с). Инерционность применяемых датчиков приводит к тому, что при расчете профиля солёности возникает ложная структура, имеющая вертикальный масштаб, соизмеримый с толщиной слоя скачка температуры. Поэтому становится невозможным измерение тонкой вертикальной структуры вод при разрешении по глубине менее 10 метров. Существенно повысить качество профильных измерений можно путем создания автономных управляемых зондов, оснащенных системой терминального управления, обеспечивающей с высокой точностью движение по назначенной траектории на заданную глубину за требуемое время при выполнении операций регистрации данных измеряемых параметров. Это позволит организовать новые виды комплексных исследований океанской среды за счёт более гибкого управления такими специфичными объектами-носителями платформ сбора данных, какими являются морские зонды. Специфические свойства морских зондов проявляются в существенном изменении их динамических характеристик вследствие изменения плотности воды в процессе погружения, а также в случайном характере начальных условий их управляемого движения при вводе в эксплуатацию, например, при десантировании. Это приводит к тому, что обычные регуляторы с постоянными параметрами настройки не могут обеспечить качественное управление морским зондом во время сбора данных при погружении и, как следствие, возникают ошибки в результатах профильных измерений. Таким образом, повышение точности профильных измерений напрямую связано с необходимостью разработки новых алгоритмов управления объектами с изменяющимися характеристиками.

Перспективным в этом направлении является развитие метода синтеза терминальных управлений [1], основанного на концепциях обратных задач динамики и локальной оптимизации применительно к цифровым системам. Задача терминального управления в рассматриваемом случае сводится к переводу объекта из начального состояния в назначенное конечное. При этом траектория и временной интервал движения задаются, а роль терминального регулятора сводится к тому, чтобы осуществить движение управляемого объекта по заданной программе. Применение терминального управления к морским зондам позволяет проходить измеряемые профили до заданных глубин за требуемое программой исследований время. При этом начальное и конечное значения фазовых переменных (глубина погружения, скорость и ускорение зонда) определяются методикой измерений.

Цель настоящей статьи состоит в построении и исследовании алгоритма синтеза терминального управления для цифрового регулятора, обеспечивающего управление морским зондом, выполняющим профильные измерения характеристик морской среды при различных режимах функционирования системы.

Синтез алгоритма терминального управления для цифрового регулятора. Под терминальным управлением в рассматриваемом случае будем понимать перевод морского зонда из начального

состояния $x(t_0)$ в требуемое терминальное $x(t_f)$ по назначенной траектории за заданное время. При

этом траектория движения может определяться как в параметрической форме, так и в неявном виде как решение некоторого уравнения. Задача синтеза алгоритма терминального управления ставится таким образом, чтобы обеспечить движение морского зонда по назначенной траектории $y(t)$ при минимизации функционала качества $G(u(t))$. При этом вводятся ограничения на управляющее воздействие $u(t)$ и динамику отклонения управляемой координаты $z(t)$ от назначенной траектории $y(t)$.

Синтез алгоритма терминального управления морским зондом проведем для цифрового регулятора в соответствии с методом [1]. При этом будем считать, что управляющее воздействие формируется микроконтроллером в результате решения конечно-разностного уравнения, описывающего закон управления для регулятора, и имеет вид ступенчатого сигнала

$$u(t) = u(kT), \quad \forall t \in [t_0; t_f] \quad \text{при} \quad kT \leq t < (k+1)T, \quad k = 0, 1, 2, \dots,$$

где T – период дискретизации; t_0 и t_f – начальное и терминальное время.

Управляющий ступенчатый сигнал подаётся на вход аналогового электропривода гидравлического насоса, который изменяет объём камеры плавучести, что приводит к изменению выталкивающей силы и, соответственно параметров движения морского зонда. При этом величина выталкивающей силы, регулирующей плавучесть, будет ограничена конечной длиной хода поршня гидравлического насоса. Модель объекта управления – морского зонда вместе с электроприводом и насосом представлена линейным дифференциальным уравнением [3]

$$\ddot{z}(t) = -a\ddot{z}(t) - bu(t); \quad t \in [t_0; t_f]; \quad a = \rho_e a_1; \quad b = \rho_e b_1, \quad (1)$$

с начальными условиями $t = t_0$; $z(t_0) = z_0$; $\dot{z}(t_0) = \dot{z}_0$; $\ddot{z}(t_0) = \ddot{z}_0$, где ρ_e – плотность морской воды.

Таким образом, модель системы терминального управления представляется непрерывно-дискретной структурой.

Решение задачи синтеза осуществляется в три этапа. На первом этапе определяется траектория желаемого движения как функция времени $y(t)$, на втором – закон управления и параметры регулятора, на третьем – разрабатываются алгоритм и программа для микроконтроллера, обеспечивающего движение морского зонда в терминальное состояние по назначенной траектории.

Желаемая траектория $y(t)$ рассчитывается по заданным краевым условиям в начале и конце движения, а также необходимому времени t_f достижения терминального состояния $x(t_f)$.

Представляется она в форме, удобной для разработки алгоритма и программы генератора траектории, выполненного на базе микроконтроллера. Генератор траектории формирует временные ряды $\{y_k\}$, $\{\dot{y}_k\}$, $\{\ddot{y}_k\}$, $\{\ddot{\ddot{y}}_k\}$..., представляющие выбранную траекторию и необходимое количество её производных. Элементы временных рядов y_k получаются дискретизацией с заданным периодом T соответствующих функций в моменты времени $t_k = kT$.

Пусть ставится задача выполнить погружение морского зонда, находящегося в свободном дрейфе на водной поверхности, на глубину 100 м за 100 с, обеспечив достижение терминального состояния с нулевой вертикальной скоростью. Такие параметры погружения (относительно малая глубина и короткое время) не характерны для профильных измерений, однако они позволяют не прибегать к масштабированию для детального рассмотрения графиков управляемых процессов. Для расчёта назначенной траектории зададим граничные условия. Начальные условия на левом конце траектории $y(t)$:

$$t_0 = 0 \text{ с}; \quad y(t_0) = 0 \text{ м}; \quad \dot{y}(t_0) = 0 \text{ м/с}. \quad (2)$$

Условия на правом конце требуемой траектории, определяющие терминальное состояние, представим в следующем виде:

$$t_f = 100 \text{ с}; \quad y(t_f) = 100 \text{ м}; \quad \dot{y}(t_f) = 0 \text{ м/с}. \quad (3)$$

В соответствии с рекомендациями [1] представим требуемую траекторию в виде полиномиальной функции

$$y(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3. \quad (4)$$

Для вычисления неизвестных параметров c_i ($i = \overline{0, 3}$) воспользуемся граничными условиями (2), (3) и формулой (4), что даёт возможность построить систему из четырёх алгебраических уравнений, искомые решения которой имеют следующие значения:

$$c_0 = 0; c_1 = 0; c_2 = 0,03; c_3 = 0,00002. \quad (5)$$

С учётом (5) выражение (4), определяющее назначенную траекторию вертикального движения морского зонда при погружении как функцию времени, примет вид

$$y(t) = 0,03t^2 - 0,00002t^3. \quad (6)$$

В ряде случаев, когда помимо значений самой траектории $y(t)$ необходимо вычислять параллельно и её производные, бывает удобнее использовать численную процедуру интегрирования системы дифференциальных уравнений, решением которой является функция

$$y(t) \text{ при } t \in [t_0; t_f].$$

Дифференцируя дважды обе части выражения (6), и вводя обозначение $x_3(t) = -0,00012t$, можно построить систему неоднородных линейных дифференциальных уравнений, формирующих искомую траекторию $y(t)$, в виде

$$\left. \begin{aligned} \ddot{y}(t) &= x_3(t) + 0,06u_1(t) \\ \dot{x}_3(t) &= -0,00012u_1(t) \end{aligned} \right\}, t \in [t_0; t_f], u_1(t) = 1(t). \quad (7)$$

Далее, введением обозначений $\dot{x}_1(t) = \dot{y}(t) = x_2(t)$ и $\dot{x}_2 = \ddot{y}(t)$, система преобразуется к векторно-матричной форме

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_t(t) &= A_t x_t(t) + B_t u_1(t) \\ y_t(t) &= C_t x_t(t) + D_t u_1(t) \end{aligned} \right\}, t \in [t_0; t_f]; x_t(t_0) = 0; t_0 = 0; t_f = 100c, \quad (8)$$

$$\text{где } x_t(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix}; A_t = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; B_t = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,06 \\ -0,00012 \end{bmatrix}; C_t = [1 \ 0 \ 0]; D_t = [0], u_1(t) = 1(t).$$

Отметим, что из (7) следует $\ddot{y}(t) = \dot{x}_3(t)$.

С помощью процедуры численного интегрирования системы (8) можно получить временные ряды для назначенной траектории и её производных с периодом дискретизации T , равным постоянному шагу интегрирования, обеспечивающего устойчивость вычислительного процесса. Если временные ряды должны быть получены для больших значений T , то систему (8) следует преобразовать к конечно-разностным уравнениям.

Ступенчатый управляющий сигнал $u(kT)$ определим путём минимизации критерия

$$G[t, u(kT)] = \frac{1}{2} \{ \ddot{z}^*(t) - \ddot{z}[t, u(kT)] \}^2, \text{ при } kT \leq t < (k+1)T, k = 0, 1, 2, \dots, \quad (9)$$

где $\ddot{z}^*(t)$ – соответствует значению производной $\ddot{z}(t)$ в каждый момент времени $t \in [0; t_f]$, при котором теоретически точно выполняются равенства

$$z^{(s)}(t) = y^{(s)}(t), \quad s = \overline{0, 2}$$

и, следовательно, погружение морского зонда происходит строго по назначенной траектории. Такие значения $\ddot{z}^*(t)$ производной $\ddot{z}(t)$ называют требуемыми [1].

Ограничение на динамику отклонения $\delta(t)$ управляемой переменной $z(t)$ (глубины погружения) от назначенной траектории $y(t)$ представим в виде уравнения

$$\ddot{\delta}(t) + h_2 \ddot{\delta}(t) + h_1 \dot{\delta}(t) + h_0 \delta(t) = 0, \quad (10)$$

где

$$\delta(t) = y(t) - z(t), \quad (11)$$

а коэффициенты h_i ($i = \overline{0, 2}$), подлежат определению.

Ограничение на управляющее воздействие определяется максимально возможной скоростью и конечной длиной перемещения поршня гидравлического насоса.

Закон управления будем искать в процессе минимизации функционала (9) при помощи простого градиентного метода [4], которому соответствует итерационная процедура в виде конечно-разностного уравнения

$$u[(k+1)T] = u(kT) - \lambda \frac{\partial G[t, u(kT)]}{\partial u(kT)}, \quad (12)$$

где λ – параметр, определяющий размер шага, который остаётся постоянным в течение всей итерационной процедуры. Его можно рассматривать как коэффициент сходимости, определяющий устойчивость и скорость итерационного процесса при вычислении оптимального управления u_{opt} .

Так как уравнение (12) определяет искомое управление $u(kT)$, то его будем рассматривать как уравнение регулятора. Отметим, что успешное решение этого уравнения зависит от возможности вычисления градиента $\frac{\partial G[t, u(kT)]}{\partial u(kT)}$ и правильного выбора параметра λ .

Из (10) следует выражение для требуемой производной $\ddot{z}^*(t)$ в виде

$$\ddot{z}^*(t) = \ddot{y}(t) + h_2 \ddot{\delta}(t) + h_1 \dot{\delta}(t) + h_0 \delta(t). \quad (13)$$

Учитывая (1) и (13), перепишем выражение для функционала (9) следующим образом

$$G[u(kT)] = \frac{1}{2} \{ \ddot{y}(t) + h_2 \ddot{\delta}(t) + h_1 \dot{\delta}(t) + h_0 \delta(t) + a \ddot{z}(t) + bu(kT) \}^2. \quad (14)$$

Дифференцируя обе части (14) по $u(kT)$, найдём выражение для градиента

$$\frac{\partial G[t, u(kT)]}{\partial u(kT)} = \{ \ddot{y}(t) + h_2 [\ddot{y}(t) - \ddot{z}(t)] + h_1 [\dot{y}(t) - \dot{z}(t)] + h_0 [y(t) - z(t)] + a \ddot{z}(t) + bu(kT) \} b, \quad (15)$$

где $kT \leq t < kT + T$, $k = 0, 1, 2, \dots$.

Из формулы (15) следует, что для вычисления градиента требуется знание значений функции $y(t)$, описывающей назначенную траекторию движения, и её производных (в рассматриваемом случае до третьей производной включительно), значений управляемой координаты и её производных, параметров a и b модели объекта, а также значения управляющей функции $u(kT)$ при $kT \leq t < kT + T$. Таким образом, если известна траектория назначенного движения и доступна для измерения управляемая координата вместе со своими производными, а также известна модель объекта в виде (1), то вычисление градиента на каждом шаге итерационного процесса не вызывает затруднений и уравнение регулятора с учётом (12) и (15) примет вид

$$u[(k+1)T] = u(kT) - \lambda [\ddot{y}(t) + h_2 \ddot{\delta}(t) + h_1 \dot{\delta}(t) + h_0 \delta(t) + a \ddot{z}(t) + bu(kT)] b, \quad kT \leq t < kT + T. \quad (16)$$

Теперь исследуем влияние параметра λ , входящего в уравнение (16) на итерационный процесс приближения текущего значения управления $u(kT)$ к его оптимальному значению u_{opt} в процессе работы системы. Для этой цели введём функцию

$$\tilde{u}(kT) = u(kT) - u_{opt}. \quad (17)$$

Значение u_{opt} найдем из выражения (15), приравняв его нулю и принимая во внимание (11). При этом получаем:

$$u_{opt} = -\frac{1}{b} [\ddot{y}(t) + h_2 \ddot{\delta}(t) + h_1 \dot{\delta}(t) + h_0 \delta(t) + a \ddot{z}(t)]. \quad (18)$$

Далее, учитывая (15), (17) и (18), найдём

$$\tilde{u}(kT) = -\frac{1}{b} [\ddot{\delta}(t) + h_2 \ddot{\delta}(t) + h_1 \dot{\delta}(t) + h_0 \delta(t)], \quad kT \leq t < kT + T, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (19)$$

Вычитая из обеих частей уравнения (16) оптимальное значение управления u_{opt} , получаем конечно-разностное уравнение для $\tilde{u}(kT)$

$$\tilde{u}[(k+1)T] = \tilde{u}(kT) - \lambda [\ddot{y}(t) + h_2 \ddot{\delta}(t) + h_1 \dot{\delta}(t) + h_0 \delta(t) + a \ddot{z}(t) + bu(kT)] b. \quad (20)$$

Уравнение (20) можно упростить, если выражение в квадратных скобках в правой части умножить и разделить на b и принять во внимание (19). Тогда можно записать:

$$\tilde{u}[(k+1)T] = (1 - \lambda b^2) \tilde{u}(kT). \quad (21)$$

Однородное конечно-разностное уравнение (21) подобно дифференциальному уравнению (10), характеризующему динамику процесса отклонения переменных состояния от назначенной траектории,

описывает динамику процесса управления при стремлении его к оптимальному значению. Таким образом, основной задачей синтеза в рассматриваемом случае будет выбор параметров λ и $\overline{h_i}$, ($i = 0, 2$).

Параметр λ найдём из условия устойчивости решения однородного конечно-разностного уравнения (21). Выражение для искомого решения определяется дискретным аналогом формулы Коши-Лагранжа, которая в случае однородного уравнения имеет вид

$$\tilde{u}(NT) = (1 - \lambda b^2)^N \tilde{u}_0, \text{ где } \tilde{u}(0) = \tilde{u}_0, \quad N = 0, 1, 2, \dots \quad (22)$$

Необходимое и достаточное условие асимптотической устойчивости решения уравнения (21) следует из (22) в виде $|1 - \lambda b^2| < 1$ или $0 < \lambda < 2/b^2$.

Практика показала, что параметр λ можно вычислять по формуле

$$\lambda = 0,9 \frac{2}{b^2}. \quad (23)$$

При этом необходимо учитывать, что в параметр $b = 0,08668 \rho k_{\text{эв}}$ в качестве сомножителей входят плотность воды ρ и коэффициент усиления $k_{\text{эв}}$, который фактически играет роль добротности электрогидравлического устройства (привода камеры плавучести).

Коэффициенты $\overline{h_i}$ ($i = 0, 2$) в соответствии с рекомендациями [1], должны выбираться в зависимости от желаемой динамики движения морского зонда относительно заданной траектории. В качестве критериев качества этого движения могут выступать время и вид переходного процесса, соответствующего решению линейного однородного дифференциального уравнения (10) при задании ненулевых начальных условий, характеризующих возможное отклонение от назначенной траектории и его производные. При этом время переходного процесса t_p должно удовлетворять неравенству

$$t_p \leq 0,1 t_f, \quad (24)$$

где t_f – время перевода морского зонда из заданного начального состояния в заданное конечное.

Рассмотрим формальный алгоритм вычисления искомых коэффициентов $\overline{h_i}$ ($i = 0, 2$) при помощи системы вычислений MATLAB. Представим уравнение (10) в виде структурной схемы, изображенной на рисунке 1.

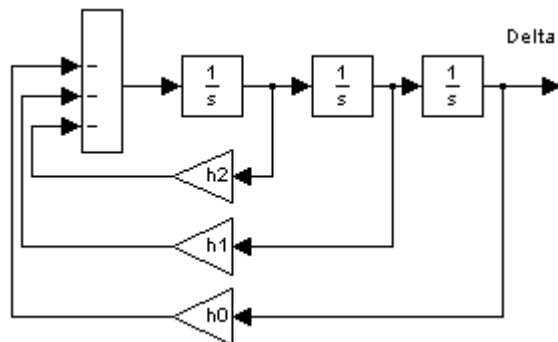


Рисунок 1 – Структурная схема для уравнения (10)

Как следует из рисунка 1, схему можно сопоставить с некоторой замкнутой линейной динамической системой, имеющей отрицательную обратную связь по состоянию, которую определяет матрица $H = [h_0 \ h_1 \ h_2]$. Прямую цепь этой системы представим следующими матрицами

$$A_h = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad B_h = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad C_h = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad D_h = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Вектор состояния x и входной сигнал u определим следующим соотношениями $x_1 = \delta$, $x_2 = \dot{\delta}$; $x_3 = \ddot{\delta}$, $u = 0$. В результате получается новая модель в пространстве состояний, эквивалентная системе (10). Далее ставится задача определения матрицы H обеспечивающей выполнение неравенства (24). Для решения этой задачи определим желаемый вектор собственных чисел для матрицы A в виде $e = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3]^T$, где $\alpha_1 = -5/t_p$; $\alpha_2 = \alpha_1 - 0,1$; $\alpha_3 = \alpha_2 - 0,1$. Далее с помощью функции *acker()* MATLAB [5], которая по заданному вектору собственных чисел e в соответствии с алгоритмом

Акермана вычисляет искомую матрицу обратных связей H для полностью управляемой системы (A_h, B_h) . В рассматриваемом случае обращение к этой функции имеет вид $H = \text{acker}(A_h, B_h, e)$. Таким образом, по заданному времени t_p вычисляются все коэффициенты $\overline{h_i}$ ($i = 0, 2$) уравнения (10).

Структура терминального регулятора определяется непосредственно из уравнения (16), из которого следует, что основной его задачей является устремление к нулю отклонения (11).

Алгоритм управления. Представим уравнение регулятора (16) в виде

$$u[(k+1)T] = (1 - \lambda b^2)u(kT) - \lambda b \varphi(t), \quad kT \leq t < kT + T, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad t \in [t_0; t_f], \quad (25)$$

где

$$\varphi(t) = \ddot{y}(t) + h_2 \ddot{\delta}(t) + h_1 \dot{\delta}(t) + h_0 \delta(t) + a \ddot{z}(t). \quad (26)$$

Функцию $\varphi(t)$, определяемую выражением (26), назовём информационной. Учитывая (11), можно сказать, что значения информационной функции определяются текущими параметрами назначенной траектории и текущим состоянием объекта. Поскольку значения информационной функции используются цифровым регулятором, будем считать, что

$$\varphi(t) = \varphi(kT) \quad \text{для} \quad kT \leq t < kT + T, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad t \in [t_0; t_f].$$

В таком случае, с учетом (25), конечно-разностное уравнение регулятора примет вид

$$u[(k+1)T] = (1 - \lambda b^2)u(kT) - \lambda b \varphi(kT)$$

или

$$u(kT) = (1 - \lambda b^2)u[(k-1)T] - \lambda b \varphi[(k-1)T], \quad kT \leq t < kT + T, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad t \in [t_0; t_f] \quad (27)$$

с начальными условиями, которые определяются при $t_0 = 0$ начальными значениями назначенной траектории и её производных, начальным состоянием управляемого объекта и начальным управлением. Таким образом, уравнение (27), представляющее собой рекуррентную формулу для вычисления текущего значения управления $u(kT)$ по заданным начальным условиям, может быть использовано для построения алгоритма и программы для цифрового регулятора системы терминального управления морским зондом.

Исследование динамики синтезированной системы управления. Рассмотрим динамику процесса терминального управления в замкнутой системе, образованной регулятором и объектом

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(kT) \\ u[(k+1)T] &= u(kT) - \lambda \frac{\partial G[t, u(kT)]}{\partial u(kT)} \end{aligned} \right\}, \quad t \in [0; t_f], \quad kT \leq t < (k+1)T, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (28)$$

где $\frac{\partial G[t, u(kT)]}{\partial u(kT)}$ определяется выражением (15).

Дифференциальное уравнение в системе (28) описывает объект управления – морской зонд вместе с исполнительным механизмом регулятора плавучести, а конечно-разностное – сам регулятор.

Динамика достижения оптимального управления при помощи регулятора определяется конечно-разностным уравнением и зависит от параметра λ и поведения градиента $\frac{\partial G[t, u(kT)]}{\partial u(kT)}$ как функции

времени при $t \in [0; t_f]$. Анализ выражения (15), определённого на полуинтервале $kT \leq t < (k+1)T$, $k = 0, 1, 2, \dots$, показывает, что в рассматриваемом случае градиент является ограниченной функцией. Действительно, все слагаемые в правой части (15) являются функциями ограниченными: производная $\ddot{y}(t) = \dot{x}_3(t) = -0,0012$ в соответствии с (7); сумма, состоящая из слагаемых с коэффициентами $\overline{h_i}$ ($i = 0, 2$) стремится к нулю, что следует из конструкции закона управления; слагаемое $a \ddot{z}(t)$ характеризует вертикальное ускорение морского зонда и является функцией ограниченной; управляющее воздействие $u(kT)$ также ограничено при соответствующем выборе λ . Если выбрать λ таким, чтобы решение (16) было асимптотически устойчивым, то при достижении $u(kT) \rightarrow u_{opt}$ градиент станет равным нулю и управление, приложенное к объекту, будет оптимальным и постоянным, по крайней мере, на полуинтервале дискретизации. Дальнейшее поведение системы зависит от свойств матрицы A , параметров назначенной траектории $y(t)$, а также координатных и параметрических возмущений. Например, изменение параметров морского зонда в момент пересечения границы двух сред

с различными плотностями воды приводит к отклонению управления $u(kT)$ от его оптимального значения u_{opt} . При этом вычисляется новое значение градиента и по итерационной процедуре происходит процесс адаптации, т.е. вычисление нового значения управления, которое будет оптимальным для объекта с новыми значениями параметров.

Таким образом, рассчитанные в соответствии с приведенными рекомендациями параметры регулятора h_i ($i = 0, 2$) и λ , при устойчивом или нейтральном объекте обеспечивают решение конечно-разностного уравнения, которое можно назвать стабилизирующим для искомого терминального управления морским зондом. Синтезированный алгоритм, как показано, обладает свойством адаптации.

Моделирование процессов в системе терминального управления. Исследование синтезированной системы выполнено методом моделирования с использованием пакета MATLAB 7.1.

При исследовании управляемого движения морского зонда к терминальному состоянию моделировался режим запуска его в эксплуатацию методом десантирования и процесс прохождения морским зондом слоя температурного скачка, характеризуемого перепадом плотности воды. В первом случае вводились ненулевые условия (отличные от расчётных) начального движения зонда при его вхождении в воду. Во втором – моделировалось скачкообразное изменение плотности морской воды. Результаты моделирования представлены в виде графиков. На рисунке 2,а изображена траектория как функция времени вертикального движения при погружении морского зонда, вошедшего в воду со скоростью 2 м/с и ускорением 0,1 м/с², а на рисунке 2,б приведен график скорости этого же движения в терминальное состояние.

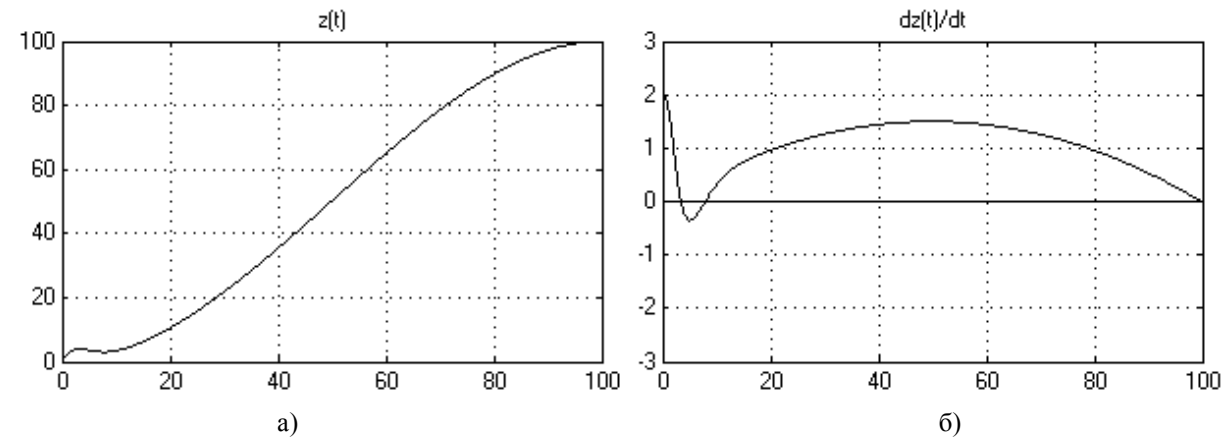


Рисунок 2 – Результаты моделирования:
а – траектория как функция времени; б – скорость погружения морского зонда

На рисунке 3,а показан сигнал управления в вольтах, полученный с учётом ограничения $\pm 0,1B$, имеющего место в электрогидравлическом устройстве привода камеры плавучести.

На рисунке 3,б изображен график изменения плотности морской воды в процессе погружения морского зонда.

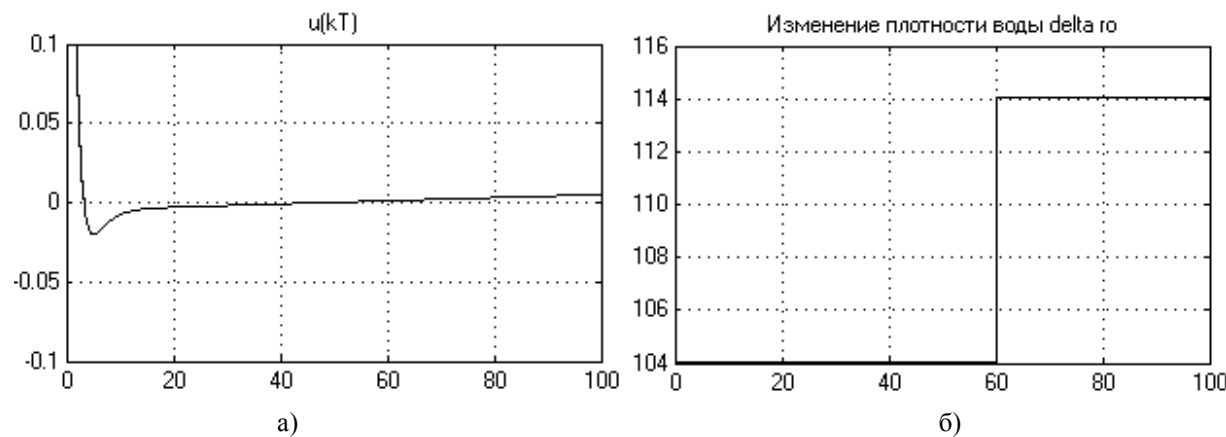


Рисунок 3 – Результаты моделирования:
а – сигнал управления; б – скачкообразное изменение плотности

Коэффициенты модели для одного из вариантов исполнения корпусной части морского зонда получили следующие значения: $a = 0,753 \text{ м/с}^3$, $b = 9,2 \text{ м/с}^2$ при $k_{эу} = 1 \text{ м/с}$, $\rho_e = 104,06 \frac{\text{кгс}^2}{\text{м}^4}$.

Коэффициенты $h_0 = 0,5$; $h_1 = 1,9$; $h_3 = 2,4$ найдены при помощи алгоритма Акермана для системы, соответствующей уравнению (10) и обеспечивают аperiodический переходный процесс длительностью $t_p = 10 \text{ с}$ при заданном времени терминального управления $t_f = 100 \text{ с}$. Параметр $\lambda = 0,02$ выбран по формуле (23) при $b = 9,02$.

Анализ результатов моделирования показал, что, несмотря на значительные отклонения начальных условий движения морского зонда при погружении от расчётных, система выводит объект на назначенную траекторию и приводит его в заданное терминальное состояние за требуемое время. Скачкообразное изменение плотности морской воды, как видно из рисунков 2, 3 и 5, практически не повлияло на динамику его заданного движения. Следует отметить, что такие результаты получены при сравнительно небольшом коэффициенте усиления $k_{эу} = 1$ при дискретизации с периодом $T = 0,1 \text{ с}$ и ограничении управляющего сигнала на уровне $\pm 0,1B$. На практике величина $k_{эу}$ ограничивается техническими возможностями электрогидравлического привода и периодом дискретизации T . Приемлемое качество переходных процессов в системе достигается при $k_{эу} > 0,2$ и $T \leq 1 \text{ с}$.

Заключение. Применение терминального управления в задачах профильных измерений параметров морской среды с помощью подвижных платформ сбора данных может открыть новые возможности для комплексных и широкомасштабных исследований океанов и морей. Поэтому актуальными остаются работы по созданию и развитию методов синтеза алгоритмов терминального управления простых по структуре и удобных для реализации на микроконтроллерах с малым энергопотреблением, которые используются на автономных морских зондах и по понятным причинам имеют ограниченные вычислительные ресурсы. Перспективным на наш взгляд в этом направлении является дальнейшее развитие общего подхода к конструированию различных цифровых регуляторов, основанного на идеях обратных задач динамики в сочетании с простыми в вычислительном отношении методами оптимизации.

Библиографический список

1. Крутько П.Д. Алгоритмы терминального управления линейными динамическими системами / П.Д. Крутько // Известия РАН. — 1998. — Вып. 6. — С. 33–45.
2. Лазарюк А.Ю. Согласование вертикальных профилей CTD–зондирования с целью устранения ложной структуры солёности в слое скачка температуры / А.Ю. Лазарюк, В.И. Пономарёв // Исследовано в России. — 2005. — С. 718–728.
3. Краснодубец Л.А. Терминальное управление морским зондом / Л.А. Краснодубец, В.В. Альчаков, А.М. Хабиб // Сб. науч. тр. Севастопольского военно-морского института им. П.С. Нахимова. — Севастополь, 2004. — Вып. 2(5). — С. 91–97.
4. Батков А.М. Методы оптимизации в статистических задачах управления / А.М. Батков. — М.: Машиностроение, 1974. — 240 с.
5. Дьяконов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов. — СПб.: Питер, 2002. — 443 с.

Поступила в редакцию 14.05.2007 г.