

УДК 62-50

В.В. Альчаков, ассистент*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: tk@sevgtu.sebastopol.ua***КОНСТРУИРОВАНИЕ ТЕРМИНАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ
СТД-ЗОНДАМИ ПРИ ПРОФИЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ**

Исследуется метод конструирования терминальных регуляторов, используемых для управления СТД-зондами, осуществляющих профильные измерения океанской среды. Предложено алгоритмическое и программное обеспечение для автоматизации основных процедур расчета коэффициентов модели объекта управления и параметров настройки регулятора. Приведены результаты моделирования в пакете Matlab.

В настоящее время автономные СТД-зонды являются основным поставщиком информации о распределении физических свойств морской воды (давление, температура и соленость) по глубине [1]. Данные о структурных свойствах океанской среды могут быть использованы для построения прогнозов дальности действия корабельных гидроакустических средств, выполнения экологического мониторинга в заданном морском регионе и решения других актуальных задач. Эффективность получаемых прогнозов и оценок во многом зависит от того насколько точно выполнены профильные измерения. Возникновение ошибок измерений может быть вызвано относительно большой скоростью зонда, при которой будет существенно сказываться инерционность применяемых датчиков. В [2] показано, что повысить качество измерений можно за счет создания автономных СТД-зондов, оснащенных системами терминального управления, обеспечивающей выполнение программы профильных измерений с высокой точностью. При этом роль регулятора сводится к тому, чтобы осуществить перевод управляемого объекта, в качестве которого выступает СТД-зонд, из некоторого начального состояния в предписанное конечное за заданный промежуток времени. Такой режим работы СТД-зонда открывает новые возможности для автоматизации комплексных синхронных измерений профилей океанской среды на больших пространствах, поэтому задача разработки методов конструирования систем управления СТД-зондами является актуальной.

Целью статьи является разработка алгоритмов и программного обеспечения автоматизированного конструирования терминальных регуляторов для управления процессами профильных измерений, выполняемых с помощью СТД-зондов.

В рамках задачи конструирования терминального регулятора под терминальным управлением будем понимать перевод СТД-зонда из начального состояния, определяемое вектором $X(t_0)$, в требуемое конечное, определяемое вектором $X(t_f)$, по назначенной траектории $y(t)$ за заданное время t_f . Структура векторов $X(t_0)$ и $X(t_f)$ в общем виде определяется выражением

$$X(t) = [x(t) \ x^{(1)}(t) \ \dots \ x^{(n)}(t)], \quad (1)$$

где $x(t)$ – глубина погружения зонда; $x^{(1)}(t)$ – первая производная по глубине погружения (скорость погружения зонда); $x^{(2)}(t)$ – вторая производная по глубине погружения (ускорение погружения зонда).

На первом этапе решения задачи выполняется синтез назначенной траектории движения $y(t)$, в виде полиномиальной зависимости в соответствии с рекомендациями, изложенными в [3]. В общем виде траектория может быть описана функцией

$$y(t) = \sum_{i=0}^n c_i t^i, \quad (2)$$

где n – максимальная степень полинома, зависящая от числа начальных и конечных условий, определяемых векторами $X(t_0)$ и $X(t_f)$; c_i – неизвестные коэффициенты полинома, подлежащие определению.

Коэффициенты c_i , входящие в (1), могут быть найдены как решение системы алгебраических уравнений, построенной на основе полиномиального представления (2) и его производных, а также на основе заданных граничных условий, определяемых векторами $X(t_0)$ и $X(t_f)$:

$$\left. \begin{aligned} x(t_0) &= c_0 + c_1 t_0 + c_2 t_0^2 + \dots + c_n t_0^n \\ x^{(1)}(t_0) &= c_1 + 2c_2 t_0 + \dots + n c_n t_0^{n-1} \\ &\dots \\ x^{(n)}(t_0) &= n! c_n \end{aligned} \right\} . \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} x(t_f) &= c_0 + c_1 t_f + c_2 t_f^2 + \dots + c_n t_f^n \\ x^{(1)}(t_f) &= c_1 + 2c_2 t_f + \dots + n c_n t_f^{n-1} \\ &\dots \\ x^{(n)}(t_f) &= n! c_n \end{aligned} \right\} .$$

Для программной реализации синтеза назначенной траектории движения вместо реализации численных методов решения системы алгебраических уравнений (3) удобно использовать рекуррентные соотношения, представленные в [3].

Пусть ставится задача выполнить погружение СТД-зонда на глубину 100 м за 600 с, обеспечив заданные граничные условия (компоненты вектора $X(t_0)$) на левом конце траектории, представленные в виде

$$x(t_0) = 0 \text{ м}; \quad x^{(1)}(t_0) = 0 \text{ м/с}; \quad x^{(2)}(t_0) = 0 \text{ м/с}^2,$$

и граничные условия (компоненты вектора $X(t_f)$) на правом конце траектории, представленные в виде

$$x(t_f) = 100 \text{ м}; \quad x^{(1)}(t_f) = 0 \text{ м/с}; \quad x^{(2)}(t_f) = 0 \text{ м/с}^2,$$

обеспечив при этом перевод зонда из состояния $X(t_0)$ в состояние $X(t_f)$ за терминальное время $t_f = 600$ с.

В соответствии с [3] для заданного количества граничных условий выражение для назначенной траектории $y(t)$ и ее производных, описывающих изменение во времени скорости и ускорения погружения, в общем виде будет иметь вид:

$$\begin{aligned} y(t) &= c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 + c_4 t^4 + c_5 t^5 \\ y^{(1)}(t) &= c_1 + 2c_2 t + 3c_3 t^2 + 4c_4 t^3 + 5c_5 t^4 \\ y^{(2)}(t) &= 2c_2 + 6c_3 t + 12c_4 t^2 + 20c_5 t^3 \end{aligned} \quad (4)$$

Расчет параметров c_i будет выполнен ниже с использованием специализированного программного обеспечения.

На втором этапе решения задачи выполняется синтез терминального управления в соответствии с методом [3, 4], при этом основная цель управления состоит в том, чтобы обеспечить движение СТД-зонда по назначенной траектории $y(t)$, полученной на первом этапе решения задачи, при минимизации отклонения от назначенной траектории $\delta(t) = y(t) - z(t)$, описываемого функционалом качества $G(t, u)$. Вводятся также ограничения на управляющее воздействие $u(t)$ и динамику отклонения управляемой координаты $z(t)$ от назначенной траектории $y(t)$.

Будем считать, что управляющее воздействие $u(t)$ формируется бортовым компьютером СТД-зонда в результате решения конечно-разностного уравнения, описывающего терминальный регулятор, 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.

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

$$\delta^{(3)}(t) + h_2 \delta^{(2)}(t) + h_1 \delta^{(1)}(t) + h_0 \delta(t) = 0, \quad (5)$$

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

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

$$G[t, u(kT)] = \frac{1}{2} \left\{ z^{(3)*}(t) - z^{(3)}[t, u(kT)] \right\}^2, \quad \text{при} \quad kT \leq t < (k+1)T, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (6)$$

где $z^{(3)*}(t)$ – соответствует значению производной $z^{(3)}(t)$ 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 $z^{(3)*}(t)$ производной $z^{(3)}(t)$ называют требуемыми.

Закон управления будем искать в процессе минимизации функционала (6) при помощи простого градиентного метода, которому соответствует итерационная процедура в виде конечно-разностного уравнения

$$u[(k+1)T] = u(kT) - \lambda \frac{\partial G[t, u(kT)]}{\partial u(kT)}, \quad (7)$$

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} . Уравнение (7) определяет искомое управление $u(kT)$, поэтому оно может быть рассмотрено как уравнение терминального регулятора. Отметим, что успешное решение этого уравнения зависит от возможности вычисления градиента $\frac{\partial G[t, u(kT)]}{\partial u(kT)}$ и правильности выбора параметра λ . Рекомендации по выбору λ приведены в [5].

Из (5) следует выражение для требуемой производной $z^{(3)*}(t)$ в виде

$$z^{(3)*}(t) = y^{(3)}(t) + h_2 \delta^{(2)}(t) + h_1 \delta^{(1)}(t) + h_0 \delta(t). \quad (8)$$

В решаемой задаче была использована математическая модель, представленная в [2] для которой функционал (6) может быть переписан в виде

$$G[u(kT)] = \frac{1}{2} \{ y^{(3)}(t) + h_2 \delta^{(2)}(t) + h_1 \delta^{(1)}(t) + h_0 \delta(t) + a z^{(2)}(t) + b u(kT) \}^2, \quad (9)$$

где $kT \leq t < kT + T$, $k = 0, 1, 2 \dots$; a и b – постоянные параметры, зависящие от конструктивного исполнения СТД-зонда.

Из последнего соотношения 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, то вычисление градиента на каждом шаге итерационного процесса не вызывает затруднений и уравнение регулятора с учётом (7) и (9) примет вид

$$u[(k+1)T] = u(kT) - \lambda [y^{(3)}(t) + h_2 \delta^{(2)}(t) + h_1 \delta^{(1)}(t) + h_0 \delta(t) + a z^{(2)}(t) + b u(kT)] b, \quad (10)$$

где $kT \leq t < kT + T$; $k = 0, 1, 2 \dots$; $t \in [t_0, t_f]$.

Введя обозначение $\varphi(t) = y^{(3)}(t) + h_2 \delta^{(2)}(t) + h_1 \delta^{(1)}(t) + h_0 \delta(t) + a z^{(2)}(t)$, уравнение регулятора (10) можно привести к более удобному виду, т.е.

$$u[(k+1)T] = (1 - \lambda b^2) u(kT) - \lambda b \varphi(t). \quad (11)$$

Учитывая что $\delta(t) = y(t) - z(t)$, можно сказать, что функция $\varphi(t)$ определяется текущими параметрами назначенной траектории $y(t)$ и текущим состоянием объекта $z(t)$. Поскольку значения функции $\varphi(t)$ используются цифровым регулятором, будем считать, что

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

В таком случае конечно-разностное уравнение терминального регулятора примет вид

$$u[(k+1)T] = (1 - \lambda b^2) u(kT) - \lambda b \varphi(kT) \quad (12)$$

с начальными условиями, которые определяются в момент времени t_0 начальными значениями функции

$y(t)$ и ее производными $y^{(1)}(t)$, $y^{(2)}(t)$ и $y^{(3)}(t)$, начальным состоянием СТД-зонда $X(t_0)$ и начальным управлением.

Для автоматизации конструирования терминального регулятора, было разработано специализированное программное обеспечение (СПО), функционирующее под управлением пакета Matlab. Схема алгоритма конструирования терминального регулятора изображена на рисунке 1.

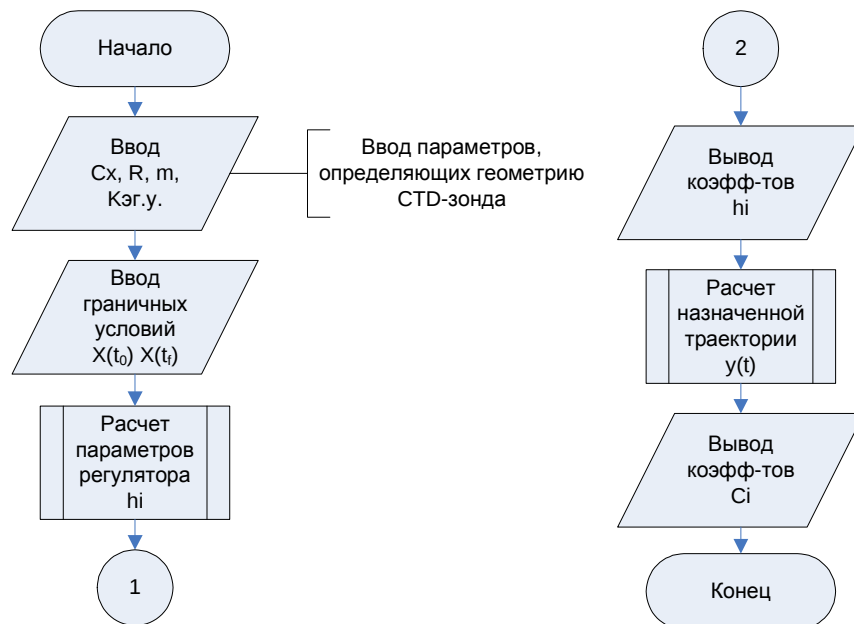


Рисунок 1 – Схема алгоритма конструирования терминального регулятора

Для удобства использования, СПО оснащено диалоговой формой ввода параметров СТД-зонда, определяющего его геометрические характеристики, а также начальных и конечных значений назначенной траектории движения.

Главная оконная форма приложения показана на рисунке 2.

Рисунок 2 – Главное окно приложения

При нажатии на кнопку «Расчет параметров регулятора» осуществляется вычисление параметров h_i ($i = \overline{0, 2}$), которые выводятся в рабочую область Matlab, а также строится график решения уравнения (5) при найденных h_i и ненулевых начальных условиях.

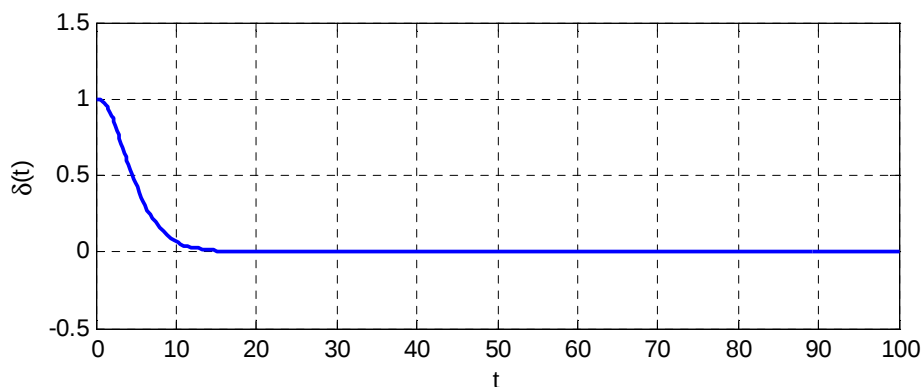


Рисунок 3 – Решение уравнения (5) при вычисленных с помощью алгоритма Аккермана параметрах h_i ($h_1 = 0,21$; $h_2 = 1,07$; $h_3 = 1,08$)

Для нахождения коэффициентов c_i , входящих в (4), была использована специально разработанная в соответствии с рекомендациями [3] Matlab-функция GetTrCoef, принимающая в качестве входных параметров вектор граничных условий на левом конце траектории, вектор граничных условий на правом конце траектории и значение терминального времени.

Текст m-файла функции представлен ниже.

```
function C=GetTrCoef(Xo, Xk, tf)
r=length(Xo);          % КОЛИЧЕСТВО НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ
n=length(Xk);          % КОЛИЧЕСТВО КОНЕЧНЫХ УСЛОВИЙ
C=zeros(1, 2*r+n);
for i=0:r-1
    C(i+1)=Xo(i+1)/factorial(i); % ПЕРВЫЕ r ПАРАМЕТРОВ Ci (i=0,1,...,r-1)
end
for i=r:r+n-1
    summa_1=0;
    summa_2=0;
    for nu=0:i-1
        summa_1=summa_1+factorial(r+n-nu-1)*C(nu+1)/factorial(r+n-i-1)/factorial(i-nu)/tf^(i-nu);
    end
    for nu=0:r+n-i-1
        summa_2=summa_2+((-1)^nu)*factorial(r+n-nu-1)*Xk(nu+1)/factorial(i)/factorial(r+n-i-nu-1)/factorial(nu)/tf^(i-nu);
    end
    C(i+1)=summa_2-summa_1;
end
```

Значения коэффициентов c_i , полученные с помощью функции GetTrCoef, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения коэффициентов c_i

Коэффициент	Значение
c_0	0
c_1	0
c_2	0
c_3	$4,6296 \cdot 10^{-6}$
c_4	$-1,1574 \cdot 10^{-8}$
c_5	$7,7160 \cdot 10^{-12}$

Результаты расчета назначенной траектории движения по вычисленным коэффициентам c_i ($i = \overline{0, 5}$) изображены на рисунке 4.

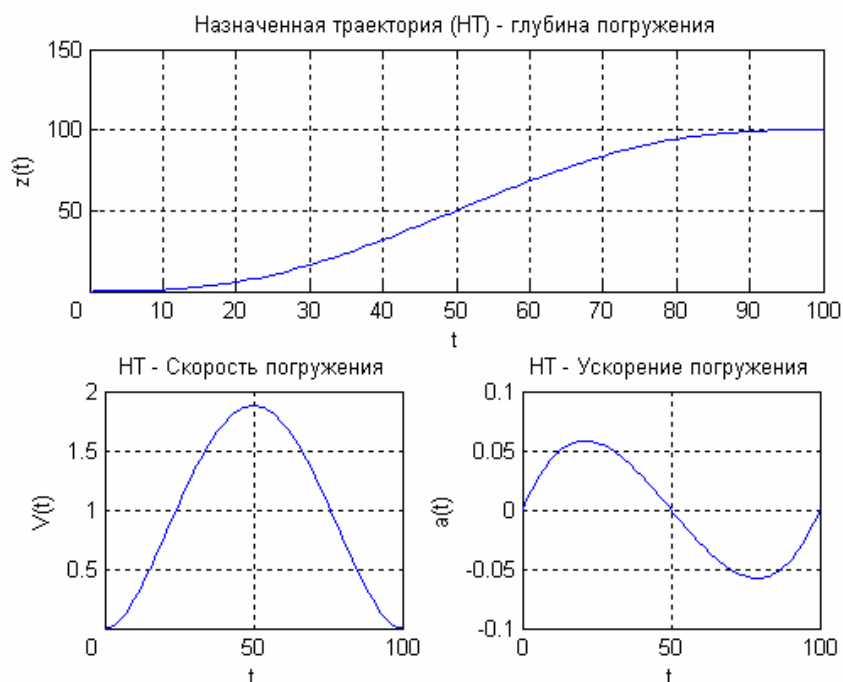


Рисунок 4 – Назначенная траектория движения, рассчитанная с помощью СПО

Рассмотренный алгоритм прост по своей структуре и может быть реализован на бортовом компьютере СТД-зонда для расчета терминального управления в реальном масштабе времени.

Применение терминального регулятора сводится к построению замкнутой системы управления, обобщенная функциональная схема которого показана на рисунке 5.

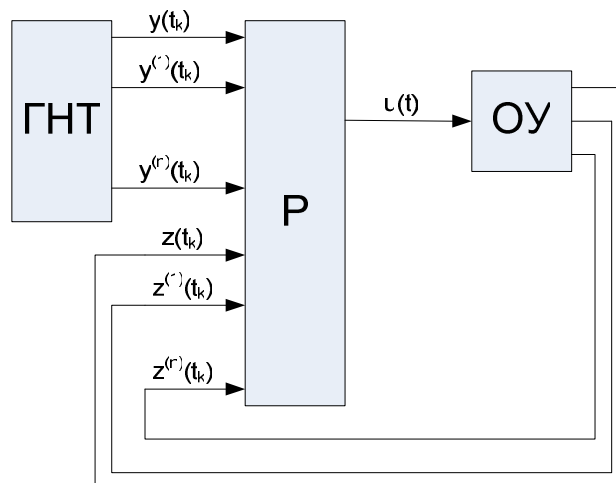


Рисунок 5 – Функциональная схема замкнутой системы с терминальным регулятором в контуре управления

На рисунке 5 приняты следующие обозначения: ГНТ – генератор назначенной траектории; Р – регулятор; ОУ – объект управления.

Анализ результатов предложенного подхода к конструированию терминальных регуляторов, представленных в [2], позволяет сделать заключение о том, что применение данного вида регуляторов способствует повышению точности управления СТД-зондами, используемыми при проведении профильных измерений океанской среды.

Дальнейшие исследования будут связаны с распространением предложенного подхода к конструированию терминального регулятора на случай нелинейной модели объекта управления с произвольной структурой.

Библиографический список

1. Океанология: средства и методы океанологических исследований / Г.В. Смирнов [и др.]. — М.: Наука, 2005. — 800 с.
2. Краснодубец Л.А. Синтез цифрового регулятора для терминальной системы профильных измерений океанской среды / Л.А. Краснодубец, В.В. Альчаков // Вестник СевГТУ. Сер. Автоматизация процессов и управление: сб. науч. тр. — Севастополь, 2007. — Вып. 83. — С. 9–16.
3. Батенко А.П. Системы терминального управления / А.П. Батенко. — М.: Радио и связь, 1984. — 160 с.
4. Крутько П.Д. Алгоритмы терминального управления линейными динамическими системами / П.Д. Крутько // Известия РАН. Теория и системы управления. — 1998. — Вып. 6. — С. 33–45.
5. Краснодубец Л.А. Терминальное управление в морских наблюдательных системах с подвижными платформами сбора данных / Л.А. Краснодубец // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2008. — Вып. 2. — С. 141–153.

Поступила в редакцию 7.10.2008 г.