

## ТЕРМИНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОГРУЖАЕМЫМИ ЗОНДАМИ, ИСПОЛЪЗУЕМЫМИ В МОРСКИХ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Л.А. Краснодубец, В.В. Альчаков

Севастопольский национальный  
технический университет  
г. Севастополь, Стрелецкая бухта,  
Студгородок  
E-mail: tk@sevgtu.sebastopol.ua

*В статье рассматривается алгоритм синтеза системы терминального управления погружаемыми зондами, используемыми в морских наблюдательных системах. Приведено математическое описание модели движения зонда, выполнено моделирование рассматриваемой системы в пакете Matlab, проведен анализ полученных результатов.*

Морские наблюдательные системы, построенные на основе использования подвижных платформ сбора данных (ПСД), занимают важное место в исследовании Мирового океана [1]. В качестве носителей ПСД часто выступают малогабаритные устройства поплавкового типа, которые перемещаются вместе с исследуемой средой (дрифтеры), а также обладающие способностью погружаться и всплывать (ныряющие буи или зонды).

В настоящее время известны [2] ныряющие буи, оснащенные системой автоматического управления глубиной погружения. Эти устройства используются для мониторинга глубинной части океанской среды в рамках международного проекта ARGO. Буи системы ARGO выпускаются несколькими производителями и обладают примерно одинаковыми техническими характеристиками. Модели APEX и SOLO производятся в США, PROVOR – во Франции, NINJA – в Японии. Конструкция типового буя системы ARGO [3] изображена на рисунке 1, где приняты следующие обозначения: 1 – датчик температуры/солености, 2 – микропроцессорная система и спутниковый передатчик, 3 – электродвигатель с редуктором, 4 – поршневой насос, 5 – батарея электропитания, 6 – рабочая жидкость, 7 – камера изменения плавучести.

Технические характеристики буев ARGO обеспечивают достижение заданной

глубины погружения (до 2000 м) со скоростью 5-10 см/с.

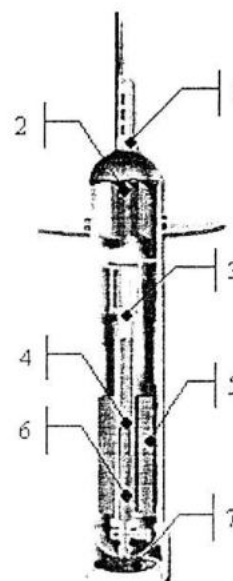


Рисунок 1 – Конструкция погружаемого зонда ARGO

Для проведения измерений в обширных регионах Мирового океана используются группировки буев. При этом синхронные измерения параметров водной среды пока недоступны, что на сегодняшний день является существенным ограничением возможностей применяемых буев ARGO. Для компенсации отмеченного недостатка увеличивается частота измерений, что ведет к уменьшению срока жизни буев. Поэтому разработка системы управления, обеспечивающей синхронные погружения измерительных буев – зондов, входящих в группировку, является актуальной задачей [2].

Синхронное погружение группы зондов предусматривает обеспечение измерений параметров стратификации всеми зондами на одной и той же глубине в одно и то же время. Можно использовать систему программного управления, сообщая одинаковую программу измерений каждому зонду. При этом изменение плотности воды на одной и той же глубине в разных регионах могут привести к различным эффектам от управляющего воздействия, что, в конечном счете, приведет к рассогласованию процессов измерений, и заданная граничная точка профиля измерений будет достигнута различными зондами в разное время. Применение терминального управления зондами, входящими в состав морской наблюдательной системы, оснащенной спутниковой

связью, позволит устранить указанный недостаток, присущий системам программного управления.

Система терминального управления зондом синтезирована на основе подхода предложенного Крутько Д.П. [4], где предлагается конструкция алгоритма управления, обеспечивающего движение объекта к терминальной точке вдоль программной траектории при минимизации уклонения. При этом задача синтеза состоит из двух частей. На первом этапе синтезируется назначенная траектория движения с помощью алгоритма, программная реализация которого предложена в [5]. На втором этапе выполняется синтез системы управления, обеспечивающий движение зонда по назначенной траектории.

Уравнение движения центра масс зонда в вертикальной плоскости описывается уравнением [6]

$$\frac{d^2 z(t)}{dt^2} = g - K_1 \rho(t) V(t) - K_2 \rho(t) \left( \frac{dz(t)}{dt} \right)^2, \quad (1)$$

$$K_1 = \frac{g}{m}, \quad K_2 = \frac{C_D S}{2m},$$

где  $z(t)$  – текущая глубина погружения,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\rho(t)$  – плотность морской воды,  $V(t)$  – объем корпуса,  $C_D$  – гидродинамический коэффициент,  $S$  – площадь поперечного сечения корпуса,  $m$  – масса,  $K_1$  и  $K_2$  – постоянные модели.

Продифференцируем левую и правую части (1). При этом имеем

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{dz^2(t)}{dt} \right) = 2v_{cp} \frac{d^2 z(t)}{dt^2},$$

где  $v_{cp}$  – средняя скорость погружения зонда. Если допустить, что плотность морской воды на всем протяжении измерений постоянна  $\rho(t) = \rho_0$ , то в результате получим

$$\frac{d^3 z(t)}{dt^3} = -K_1 \rho_0 \frac{dV(t)}{dt} - K_3 \rho_0 \frac{d^2 z(t)}{dt^2}, \quad (2)$$

$$K_3 = 2K_2 v_{cp}.$$

Изменение объема камеры плавучести зонда осуществляется за счет работы электродвигателя с редуктором, приводящего в движение поршневой насос. Объем рабочей

жидкости, перекаченной в камеру, определяется соотношением

$$V(t) = l(t)s, \quad (3)$$

где  $l(t)$  – перемещение поршня насоса ( $0 \leq l(t) \leq 0,3 \text{ м}$ ),  $s$  – площадь поперечного сечения корпуса насоса.

Уравнение, определяющее закон перемещения поршня при помощи электродвигателя можно записать в виде

$$\frac{dl(t)}{dt} = K_n u(t), \quad (4)$$

где  $K_n$  – коэффициент передачи двигателя,  $u(t)$  – управляющее напряжение.

Учитывая (3) и (4), уравнение (2) перепишем в виде

$$\frac{d^3 z(t)}{dt^3} = -K_4 \rho_0 u(t) - K_3 \rho_0 \frac{d^2 z(t)}{dt^2}, \quad (5)$$

$$K_4 = sK_n K_1.$$

Линейное дифференциальное уравнение (5) представляет собой модель динамики зонда как объекта управления с электроприводом для регулирующего органа.

Модель траектории движения зонда к терминальному состоянию примем в виде

$$y(t) = \sum_{i=0}^k C_i t^i, \quad (6)$$

$$k = a + b - 1,$$

где  $a$  – число граничных условий на левом конце траектории,  $b$  – число граничных условий на правом конце траектории.

Установим начальные и конечные условия следующими:  $y(t_0) = 0$ ,  $\dot{y}(t_0) = 0$ ,  $\ddot{y}(t_0) = 0$ ,  $y(t_f) = 1000$ ,  $\dot{y}(t_f) = 0$ ,  $\ddot{y}(t_f) = 0$ , где  $t_0$  – начальный момент времени,  $t_f = 100 \text{ с}$  – терминальное время.

В рассматриваемом случае (6) примет вид

$$y(t) = 10^{-6} t^3 - 1,5 \cdot 10^{-9} t^4 + 6 \cdot 10^{-13} t^5. \quad (7)$$

Синтез управления, обеспечивающего движение зонда по назначенной траектории, выполним методом, основанным на решении обратной задачи динамики при минимизации функционала качества, который имеет вид

$$G(u(t)) = \frac{1}{2} \left[ \frac{d^3 z^*(t)}{dt^3} - \frac{d^3 z(t, u)}{dt^3} \right]^2, \quad (8)$$

где  $z^*(t)$  – требуемые значения траектории,  $z(t)$  – реальные значения траектории,  $u(t)$  – управляющая функция.

Требуемые значения производной задаются соотношением

$$\frac{d^3 z^*(t)}{dt^3} = \frac{d^3 y(t)}{dt^3} + h_2 \frac{d^2(y(t) - z(t))}{dt^2} + h_1 \frac{d(y(t) - z(t))}{dt} + h_0(y(t) - z(t)) \quad (9)$$

где составляющие в правой части выступают в роли ограничений на динамику отклонений  $\delta(t) = y(t) - z(t)$  от назначенной

траектории. Параметры  $h_0, h_1, h_2$  находятся из уравнения

$$\frac{d^3 \delta(t)}{dt^3} + h_2 \frac{d^2 \delta(t)}{dt^2} + h_1 \frac{d \delta(t)}{dt} + h_0 \delta(t) = 0, \quad (10)$$

где выбор  $h_0, h_1$  и  $h_2$  обусловлен условиями асимптотической устойчивости решения (10) и ограничений на время переходного процесса. Численные значения параметров  $h_i$  могут быть получены методом

моделирования уравнений (10) в среде Simulink в сочетании с применением процедуры параметрической оптимизации. Функционал  $G(u(t))$  с учетом (9) имеет вид

$$G(u(t)) = \frac{1}{2} \left[ \frac{d^3 y(t)}{dt^3} + h_2 \frac{d^2(y(t) - z(t))}{dt^2} + h_1 \frac{d(y(t) - z(t))}{dt} + h_0(y(t) - z(t)) + \dots \right]^2 + \dots + K_4 \rho_0 u(t) + K_3 \rho_0 \frac{d^2 z(t)}{dt^2} \quad (11)$$

Скорость изменения варьируемой функции  $u(t)$  определяется дифференциальным соотношением

$$\frac{du(t)}{dt} = -\lambda \frac{dG(u(t))}{du(t)}, \quad \lambda = const, \quad (12)$$

которое с учетом (11) можно переписать в виде

$$\frac{du(t)}{dt} = \lambda K_4 \rho_0 \left( \frac{d^3 z^*(t)}{dt^3} - \frac{d^3 z(t)}{dt^3} \right). \quad (13)$$

Искомый закон управления следует из (14) после интегрирования его левой и правой частей.

$$u(t) = K_5 \left( \frac{d^2 z^*(t)}{dt^2} - \frac{d^2 z(t)}{dt^2} \right), \quad (14)$$

где

$$K_5 = \lambda K_4 \rho_0, \quad \frac{d^2 z^*(t)}{dt^2} = \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + h_2 \frac{d(y(t) - z(t))}{dt} + h_1 (y(t) - z(t)) + h_0 \int_0^t (y(t) - z(t)) dt. \quad (15)$$

Так как техническая реализация терминального регулятора предполагается на базе микроконтроллера, то его синтезированная структура приведена к дискретному виду на основе использования метода Тастина. Информация о текущих значениях параметров траектории зонда  $z^{(i)}(kT) \quad i = 0, 1, 2$  может быть получена по показаниям бортового измерительного комплекса в составе глубиномера и акселерометра.

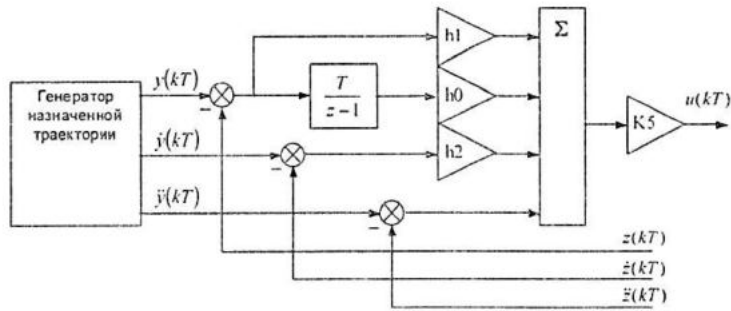


Рисунок 2 – Структурная схема цифрового терминального регулятора

Исследование синтезированной системы выполнено методом моделирования с использованием пакета Matlab. Модель системы, построена в Simulink и представляет собой комбинацию непрерывной нелинейной модели объекта Sonde и дискретного

блока терминального регулятора TCU. Структура модели в Simulink приведена на рисунке 3(а), а структура блока, формирующего программную траекторию движения на рисунке 3(б).

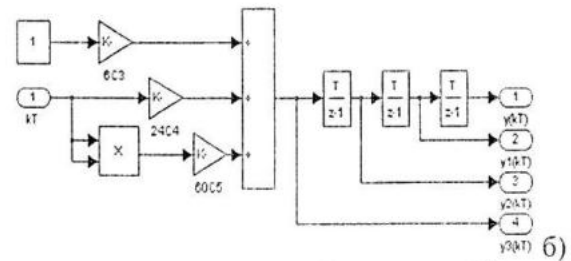
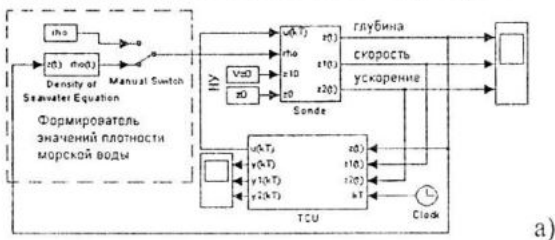


Рисунок 3 – Структура модели Simulink (а). Модель вычислителя назначенной траектории (б)

Результаты моделирования приведены на рисунке 4 – 6.

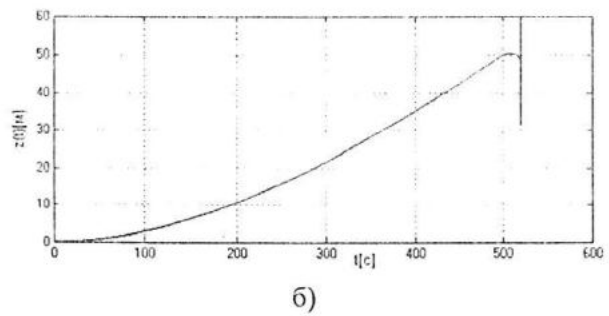
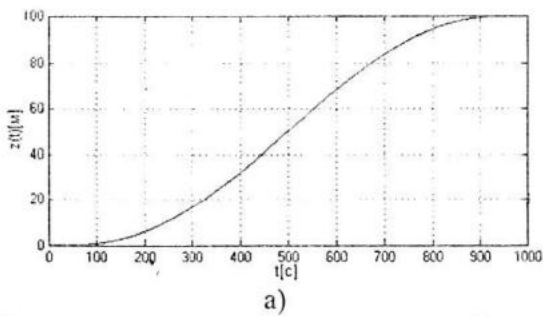


Рисунок 4 – Результаты моделирования (а) – движение зонда с терминальным регулятором в среде со скачкообразным изменением плотности, б) – движение зонда с программным управлением в среде со скачкообразным изменением плотности)

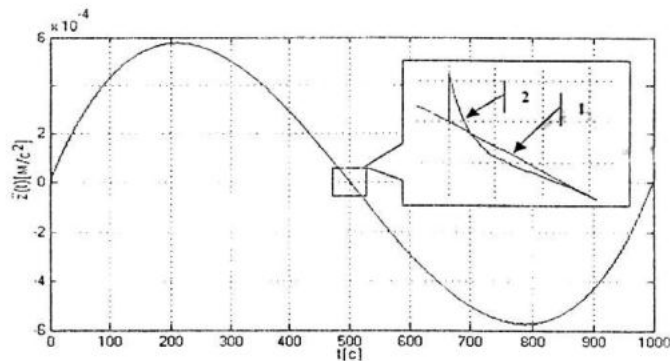


Рисунок 5 – Ускорение движения зонда с терминальным регулятором в среде со скачкообразным изменением плотности (1 – назначенное ускорение, 2 – реальное ускорение в момент скачкообразного изменения плотности)

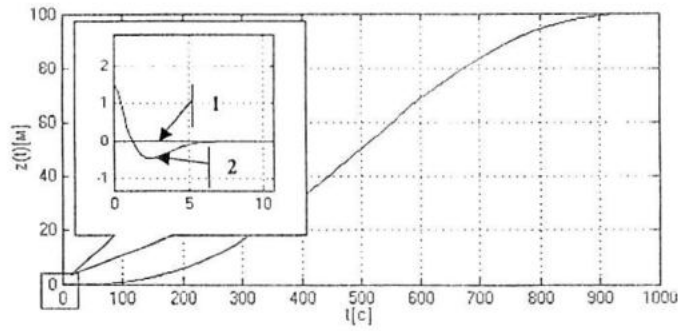


Рисунок 6 – Результаты моделирования движения зонда с терминальным регулятором при ненулевых начальных условиях (1 – назначенная траектория, 2 – реальная траектория)

При моделировании были учтены случайные возмущения, действующие на систему управления зонда, в качестве которых рассматривались неоднородности морской среды, характеризуемые изменением плотности воды. Из графиков, изображенных на рисунках 4 и 5, следует, что зонд, оснащенный системой терминального управления, независимо от характера среды достигает терминального состояния за заданное время.

Исследовался режим десантирования зондов при помощи авиации. Этот режим характеризуется ненулевыми значениями начального состояния системы терминального управления. Из графика, приведенного на рисунке 6, видно, что зонд, оснащенный системой терминального управления, начиная движение после десантирования не из нулевого начального состояния, выходит достаточно быстро на заданную траекторию и вовремя достигает терминального состояния.

Методом моделирования исследовалось сравнительное влияние скачкообразного изменения плотности морской среды на качество управления режимом погружения для двух различных систем. На рисунке 4а) изображена траектория движения зонда с терминальным регулятором. Как видно из графика, траектория движения при соответствует заданной и система достигает терминального состояния вовремя. На рисунке 4б) изображена траектория движения зонда, оснащенного системой программного управления. Как видно из графика, траектория движения зонда значительно отличается от заданной, а система не достигает назначенного состояния.

Результаты моделирования системы управления зонда с терминальным регулятором в условиях, когда существенно меняются ее начальное состояние и плотность морской воды, свидетельствуют о возможности реализации групповых синхронных профильных измерений, выполняемых в целях мониторинга структуры морской среды в обширных регионах.

В рамках выполненных исследований в дальнейшем предполагается разработка алгоритма формализованного синтеза и создание на этой основе специализированного программного обеспечения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Краснодубец Л.А. Алгоритмическое обеспечение морских наблюдательных систем с подвижными платформами сбора данных // Изв. РАН. ТИСУ. 2001. №3. – С. 15–26.
2. Данченков М.А. Проект ARGO – создание глобальной сети океанографических станций // Подводные технологии и мир океана. 2005. №1.
3. <http://www.argo.ucsd.edu/index.html>
4. Крутько П.Д. Алгоритмы терминального управления линейными динамическими системами // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1998. №6.
5. Батенко А.П. Системы терминального управления. – М.: Радио и связь, 1984. – 160 с.
6. Краснодубец Л.А., Альчаков В.В., Хабиб А.М. Терминальное управление морским зондом // Сб. науч. тр. Вып. 2(5), – Севастополь: Севастопольский ВМИ им. П.С. Нахимова, 2004. – С. 91–97.