

# Автоматизация научных исследований морей и океанов

УДК 551.46:681.51

Л.А. Краснодубец\*, В.И. Забурдаев\*\*, В.В. Альчаков\*

## Управление морскими буйами-профилемерами как метод повышения репрезентативности термохалинных измерений. Синтез и моделирование системы управления

Представленная работа является второй частью статьи тех же авторов, опубликованной в «Морском гидрофизическом журнале» в № 4 за 2012 г. В ней выполнен анализ нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих процесс управления гидрофизическим зондом с изменяемой плавучестью. Показана возможность эффективного управления скоростью погружения (всплытия) зонда с целью уменьшения динамической погрешности измерения вследствие различной инерционности используемых первичных преобразователей.

**Ключевые слова:** буй-профилемер, профильные измерения, управление движением, адаптивный регулятор, моделирование движения.

**Постановка и решение задачи выведения морского профилемера на заданную глубину с нулевой вертикальной скоростью.** Математическая модель морского профилемера как объекта управления, построенного на основе ныряющего буя с регулируемой плавучестью, представлена в работе [1] нелинейным дифференциальным уравнением (20) с начальными условиями (22) и параметрами (31), характеризующим процесс погружения. Поставим задачу (об адаптивном управлении с эталонной моделью) – найти управление  $u(t, z, \dot{z})$  в форме обратной связи, которое обеспечит перевод профилемера из начального состояния (22) в [1], соответствующего его неподвижному положению на поверхности в точке гидрологической станции, в новое неподвижное состояние стационарного равновесия  $z(t) = \bar{z}$ ;  $\dot{z}(t) = 0$ , соответствующее заданной глубине  $\bar{z}$ . При этом время перехода в требуемое состояние  $t_p$  также должно задаваться. Далее потребуем, чтобы процессы  $z(t) \rightarrow \bar{z}$ ;  $\dot{z}(t) \rightarrow 0$  в замкнутой системе управления

$$\ddot{z}(t) + \alpha_1 \dot{z}^2(t) = -b_0 u(t, z, \dot{z}) + f_p(z), t \in [t_0, t_f], t_p \leq t_f, \quad (1)$$

полученной на основе (20) в статье [1], проходили в малой окрестности эталонных процессов  $z^*(t) \rightarrow \bar{z}$ ;  $\dot{z}^*(t) \rightarrow 0$ , формируемых эталонной моделью

$$\ddot{z}^*(t) + \alpha_1 \dot{z}^*(t) + \alpha_0 z(t) = \beta_0 \bar{z}; \alpha_0, \alpha_1, \beta_0 = \text{const} > 0, \quad (2)$$

© Л.А. Краснодубец, В.И. Забурдаев, В.В. Альчаков, 2012

определяющей желаемые динамические и статические свойства проектируемой системы автоматического управления движением профилимера. Выбор эталонной модели в виде (2) обусловлен только порядком уравнения (1). Степень приближения эталонных процессов к соответствующим процессам в управляемой системе будем оценивать значением целевой функции

$$G(u) = \frac{1}{2} [\ddot{z}^*(t) - \ddot{z}(t, u)]^2, t \geq 0, \quad (3)$$

где  $G(u)$  представляет собой нормированное по массе значение энергии ускорения [2], вычисляемой в окрестности траектории движения эталонной модели. Чем меньше величина  $G(u)$ , тем в большей степени процессы в системе приближаются к процессам в эталонной модели. Целевая функция (3) при такой постановке служит одновременно и критерием управления и целевым условием адаптации. При этом в роли физически реализуемого аргумента целевой функции выступает текущее значение функции управления.

Решение поставленной задачи выполним следующим образом. Пусть начальное состояние модели (2) в точности соответствует начальному состоянию объекта (1), а степень приближения управляемых процессов к эталонным процессам соответственно в системе и эталонной модели оценивается значением целевой функции (3) в ходе функционирования системы автоматического управления.

В соответствии с градиентным методом отыскания  $\min G(u)$  уравнение для вычисления оптимального управления примет вид

$$\frac{du}{dt} = -\lambda \frac{\partial G(u)}{\partial u}, \quad (4)$$

где  $\lambda = \text{const}$  характеризует скорость, с которой управление  $u(t)$  приближается к оптимальному значению  $u_{\text{opt}}$ . Соотношение (4) соответствует уравнению скоростного градиента [3]. Далее, вычисляя производную  $\frac{\partial G(u)}{\partial u}$  при помощи (3) с учетом (1) и подставляя полученный результат в (4), можно получить уравнение, определяющее искомое управление в дифференциальной форме

$$\frac{du}{dt} = -\lambda b_0 [\ddot{z}^* - \ddot{z}(t, u)]. \quad (5)$$

Анализ уравнения (1) показывает, что изменение какого-либо из параметров объекта  $a_0, a_1, b_0$  (или всех вместе) вызывает изменение ускорения  $\ddot{z}(t, u)$ , что в соответствии с (5) приводит к вычислению нового управления  $u(t)$ , обеспечивающего адаптацию системы управления к новым условиям функционирования. По этой причине закон управления (5) можно назвать законом прямого адаптивного управления. Структура регулятора, реализующего такой закон, формируется в ходе преобразования уравнения (5) к виду,

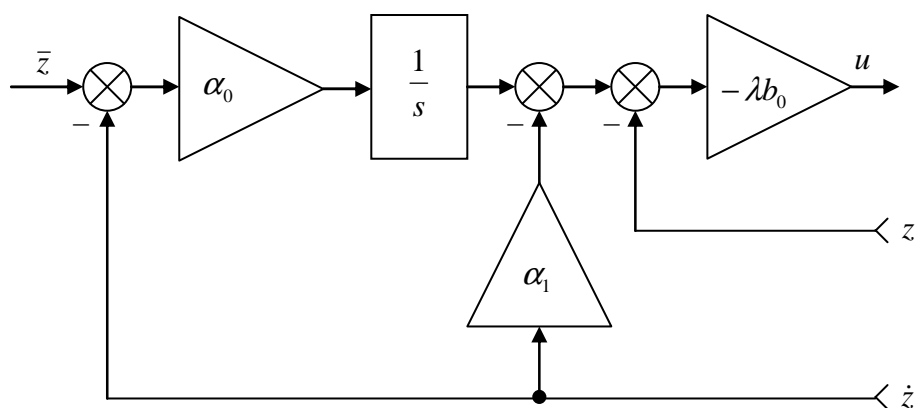
удобному для технической реализации. Сначала с учетом (1) и (2) выражение (5) принимает вид

$$\frac{du}{dt} = -\lambda b_0 [\alpha_0 (\bar{z} - z^*) - \alpha_1 \dot{z}^* - \dot{z}], \quad (6)$$

где  $z^*$  и  $\dot{z}^*$  – переменные эталонной модели, которые принимают участие в формировании управляющей функции. Заменой в (6) этих переменных соответствующими переменными, поступающими от объекта управления  $z^* = z$  и  $\dot{z}^* = \dot{z}$ , формируются цепи обратной связи. Далее путем интегрирования при нулевых начальных условиях обеих частей модифицированного уравнения (6) получается окончательная форма (аналитическая структура) закона управления для адаптивного регулятора в виде

$$u = -\lambda b_0 \left\{ \alpha_0 \int_0^t [(\bar{z} - z) dt - \alpha_1 z - \dot{z}] \right\} = -k \left\{ \alpha_0 \int_0^t [(\bar{z} - z) dt - \alpha_1 z - \dot{z}] \right\}. \quad (7)$$

По выражению (7) можно построить структурную схему адаптивного регулятора, которая изображена на рис. 1.



Р и с. 1. Структурная схема адаптивного регулятора

Задача синтеза параметров адаптивного регулятора сводится к выбору параметра  $\lambda$ , а также вычислению параметров  $\alpha_0$  и  $\alpha_1$  эталонной модели, которые одновременно являются параметрами регулятора и определяются требуемыми показателями качества переходной характеристики проектируемой системы управления. Они могут быть вычислены различными методами [4].

Исследуем влияние параметра  $\lambda$  на свойства замкнутой системы управления с регулятором, реализующим сконструированный закон управления (7). Прежде всего отметим, что по построению дифференциальный закон управления (6) при заданных начальных условиях описывает траекторию

движения управляющей функции  $u(t)$  к ее оптимальному значению  $u_{\text{opt}}$ . Далее введем в рассмотрение функцию

$$\tilde{u}(t) = u(t) - u_{\text{opt}}, \quad u_{\text{opt}} = \text{const}, \quad (8)$$

характеризующую текущее отклонение управляющей функции  $u(t)$  относительно ее оптимального значения  $u_{\text{opt}}$ , которое можно найти из условия минимума целевой функции (3) как решение уравнения

$$\frac{\partial G(u)}{\partial u} = b_0[\ddot{z}^* - \ddot{z}(u)] = 0. \quad (9)$$

Действительно, из уравнения (9) следует, что

$$\ddot{z}^* = \ddot{z}(u_{\text{opt}}). \quad (10)$$

В таком случае в соответствии с (1) для стадии погружения ( $u < 0$ ) выражение для оптимального управления определяется соотношением

$$u_{\text{opt}} = -\frac{1}{b_0} \ddot{z}(u_{\text{opt}}) - \frac{1}{b_0} a_1 \dot{z}^2 + \frac{1}{b_0} f_p, \quad u_{\text{opt}} < 0,$$

которое с учетом (10) преобразуется к виду

$$u_{\text{opt}} = -\frac{1}{b_0} \ddot{z}^* - \frac{1}{b_0} a_1 \dot{z}^2 + \frac{1}{b_0} f_p, \quad u_{\text{opt}} < 0. \quad (11)$$

К аналогичному виду, определяющему функцию управления, можно преобразовать уравнение (1). Имеем

$$u(t) = -\frac{1}{b_0} \ddot{z} - \frac{1}{b_0} a_1 \dot{z}^2 + \frac{1}{b_0} f_p, \quad u(t) < 0. \quad (12)$$

Принимая во внимание (11) и (12), перепишем (8) с учетом  $u(t) < 0$  следующим образом:

$$\tilde{u}(t) = -[u(t) - u_{\text{opt}}] = \frac{1}{b_0} \ddot{z} + \frac{1}{b_0} a_1 \dot{z}^2 - \frac{1}{b_0} f_p - \frac{1}{b_0} \ddot{z}^* - \frac{1}{b_0} a_1 \dot{z}^2 + \frac{1}{b_0} f_p = -\frac{1}{b_0} (\ddot{z}^* - \ddot{z}). \quad (13)$$

Далее, дифференцируя обе части (8) и подставляя полученный результат вместе с (13) в уравнение (5), получим дифференциальное уравнение для отклонения  $\tilde{u}(t)$  в виде

$$\frac{d\tilde{u}}{dt} + \lambda b_0^2 \tilde{u} = 0; \quad \tilde{u}(t_0) = \tilde{u}_0; \quad t \in [t_0, t_f]. \quad (14)$$

Соответствующее характеристическое уравнение записывается следующим образом:  $s + \lambda b_0^2 = 0$ , а его решение определяет характеристическое число  $s = -\lambda b_0^2$ .

Таким образом, решение уравнения (14) с указанными начальными условиями можно представить в виде

$$\tilde{u} = \tilde{u}_0 \exp(-\lambda b_0^2 t), \quad t \in [t_0, t_f]. \quad (15)$$

Из выражения (15) следует, что при  $s = -\lambda b_0^2$  для  $t \rightarrow \infty$  отклонение управляющей функции  $\tilde{u}(t)$  от ее оптимального значения  $u_{\text{opt}}$  по экспоненте стремится к нулю. Причем скорость этого стремления пропорциональна величине

$$\lambda b_0^2 = \frac{1}{\tau_a}, \quad (16)$$

где  $\tau_a$  – постоянная времени процесса адаптации, который характеризует движение управляющей функции от ее начального значения до оптимального. При этом необходимым и достаточным условием устойчивости этого процесса является неравенство  $\lambda < 0$ .

Если задать желаемое время  $t_{pa}$  переходного процесса адаптации, то значение постоянной времени адаптации определится соотношением

$$\tau_a \approx \frac{t_{pa}}{\eta},$$

где  $\eta = 5 \dots 7$ .

При этом следует отметить, что для эффективной работы регулятора постоянная времени процесса адаптации  $\tau_a$  должна быть, по крайней мере, на порядок меньше постоянной времени  $\tau$  основного процесса управления, т.е.

$$\tau_a \leq 0,1\tau. \quad (17)$$

Учитывая последний результат и формулу (16), выражение, которое определяет абсолютное значение параметра  $\lambda$ , можно записать в виде

$$|\lambda| \approx \frac{\eta}{b_0^2 t_{pa}}. \quad (18)$$

Коэффициент усиления, входящий в выражение (11) в работе [1], с учетом (22) в [1] вычисляется по формуле

$$k = \lambda b_0^2 \approx \frac{\eta}{b_0^2 t_{pa}}. \quad (19)$$

Можно показать [5], что при неограниченном росте значения параметра  $k = \lambda b_0^2$  (коэффициента усиления адаптивного регулятора) уравнение динамики проектируемой системы управления вырождается в уравнение эталонной модели (2), которая по построению является устойчивой. По этой причине замкнутая система с адаптивным регулятором при  $k \rightarrow \infty$  остается устойчивой.

Полученный результат свидетельствует о том, что коэффициент усиления  $k = \lambda b_0$  можно выбирать без учета параметров  $\lambda$  и  $b_0$  при настройке адаптивного регулятора в процессе его наладки для работы с конкретным объектом управления в составе замкнутой системы. На практике начальное значение коэффициента усиления  $k$  можно принять равным единице, а далее экспериментально довести его до необходимого уровня.

Расчет параметров адаптивного регулятора  $\alpha_0$  и  $\alpha_1$  проведен по формулам, которые получены при помощи канонической формы записи колебательного звена, выполняющего функцию эталонной модели, и имеют вид

$$\alpha_0 = \frac{1}{\tau^2}, \quad \alpha_1 = 2\zeta \frac{1}{\tau}, \quad (20)$$

где  $\tau$  – постоянная времени процесса управления;  $\zeta$  – декремент затухания (параметр, характеризующий колебательные свойства эталонной модели).

Если принять во внимание известное приближенное соотношение  $t_p = (5...7)\tau$ , то формулы (20) можно преобразовать к виду

$$\alpha_0 \approx \frac{5...7}{t_p^2}, \quad \alpha_1 \approx 2\zeta \frac{5...7}{t_p}, \quad (21)$$

где  $t_p$  – время желаемой переходной характеристики проектируемой системы управления (длительность переходного процесса от начального состояния системы управления до момента достижения профиломером заданной глубины);  $\zeta = 0,907$  соответствует желаемому переходному процессу без перерегулирования.

Таким образом, применяя формулы (21) и учитывая неравенство (17) вместе с формулой (18), можно вычислить все параметры адаптивного регулятора  $\alpha_0, \alpha_1$  и  $\lambda$  по всего лишь одной заданной величине  $t_p$  – времени желаемой переходной характеристики. При этом время процесса адаптации выбрано из условия  $t_{pa} = 0,0001 t_p$ .

Процесс выведения морского профиломера на заданную глубину можно рассматривать как первую фазу его движения с целью подготовки к выполнению профильных измерений. Вторую фазу управляемого движения морского профиломера будем рассматривать как процесс профильных измерений, выполняемых в ходе управляемого всплытия с заданной глубины и с заданной вертикальной скоростью, которая удовлетворяет неравенству (4) в [1].

**Постановка и решение задачи управления движением морского профиломера в процессе выполнения термохалинных измерений.** Вторая фаза движения профиломера, непосредственно связанная с выполнением измерений, начинается из неподвижного состояния на заданной глубине и продолжается в режиме всплытия с заданной постоянной вертикальной скоростью до момента достижения границы разделения сред (морской поверхности). Соответствующий закон управления найдем следующим образом.

Сначала построим математическую модель, характеризующую процесс изменения скорости движения профиломера на стадии всплытия. Для этой цели в уравнении (23) из работы [1] выполним замену переменных

$$\ddot{z} = \frac{dv}{dt}, \quad \dot{z} = v,$$

где  $v$  – скорость всплытия. Полученное неоднородное нелинейное дифференциальное уравнение

$$\frac{dv}{dt} = av^2 - bu + f_p, \quad u > 0 \quad (22)$$

в соответствии с описанием стадии всплытия следует рассматривать с начальными условиями

$$t_0 = 0; \quad v(t_0) = 0, \quad (23)$$

при этом функции  $u$  и  $f_p$  должны быть известными.

Поставим задачу найти управление (управляющую функцию  $u$ ) в форме обратной связи, которое обеспечит перевод профилемера из начального состояния (2), соответствующего его неподвижному положению на заданной глубине (вблизи проекции точки гидрологической станции), в состояние движения (всплытия) с постоянной скоростью вплоть до момента  $t_f$  выхода на поверхность. При этом время  $t_p$  достижения заданной скорости  $\bar{v}$  следует задать. Далее потребуем, чтобы процессы  $v(t) \rightarrow \bar{v}$ ,  $\frac{dv(t)}{dt} \rightarrow 0$  в замкнутой системе управления

$$\frac{dv}{dt} = av^2 - bu(t, v) + f_p, \quad t \in [t_0, t_f], \quad t_p \leq t_f \quad (24)$$

проходили в малой окрестности эталонных процессов  $v^*(t) \rightarrow \bar{v}$ ;  $\dot{v}^*(t) \rightarrow 0$ , формируемых эталонной моделью

$$\dot{v}^*(t) + \alpha_0 v(t) = \beta_0 \bar{v}; \quad \beta_0 = \alpha_0 = \text{const} > 0, \quad (25)$$

определяющей желаемые динамические и статические свойства проектируемой системы автоматического управления движением профилемера. Выбор эталонной модели в виде (25) обусловлен не только порядком уравнения (22), но и выполнением равенства  $\beta_0 = \alpha_0$ , что придает выбранной модели астатические свойства. Степень приближения эталонных процессов к соответствующим процессам в управляемой системе будем оценивать значением целевой функции

$$G(u) = \frac{1}{2} [v^*(t) - \dot{v}(t, u)]^2, \quad t \geq 0, \quad (26)$$

где  $G(u)$  представляет собой нормированное по массе значение энергии ускорения [2], вычисляемой в окрестности траектории движения эталонной модели (25). Вывод закона управления, определяющего искомую управляющую

функцию, выполним по аналогии с решением задачи вывода буя-профилемера на заданную глубину с нулевой скоростью.

Принимая во внимание, что в рассматриваемом случае

$$\frac{\partial G(u)}{\partial u} = -b[\dot{v}^*(t) - \dot{v}(t, u)],$$

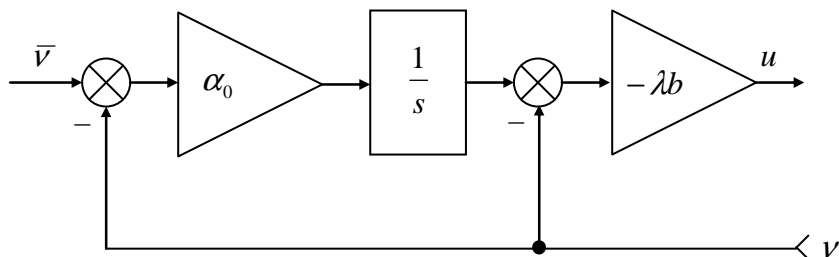
а также учитывая (4) и (25), уравнение для закона управления в дифференциальной форме можно записать в виде

$$\frac{du}{dt} = \lambda b[\alpha_0(\bar{v} - v^*) - \dot{v}]. \quad (27)$$

Далее, выполняя замену  $v^* = v$  в (27), что соответствует замыканию объекта управления вместе с регулятором отрицательной обратной связи, а также интегрируя обе части полученного уравнения при нулевых начальных условиях, можно получить аналитическое выражение для искомой управляющей функции в следующем виде:

$$u(t) = \lambda b[\alpha_0 \int_0^t (\bar{v} - v) dt - v]. \quad (28)$$

Соответствующая структурная схема адаптивного регулятора, обеспечивающего управляемое движение морского профилемера в процессе термохалинных измерений с заданной постоянной скоростью в режиме всплытия, изображена на рис. 2.



Р и с. 2. Структурная схема адаптивного регулятора скорости всплытия морского профилемера

Параметры регулятора  $\alpha_0$  и  $k$  рассчитываются по формулам

$$\alpha_0 = \frac{5 \dots 7}{t_p}, \quad k = \frac{700}{bt_p}, \quad (29)$$

которые получены с учетом того, что эталонная модель описывается дифференциальным уравнением первого порядка, а время адаптации выбрано из соотношения  $t_{pa} = 0,01t_p$ .

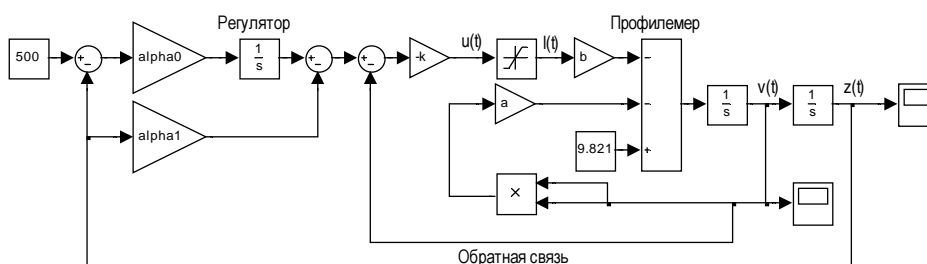


### Моделирование адаптивной системы автоматического управления.

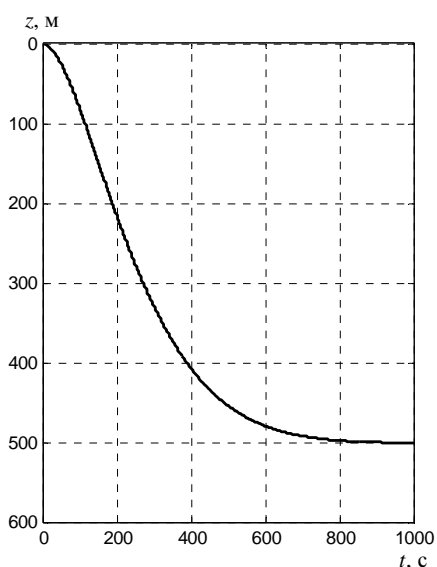
Синтезированный адаптивный регулятор исследовался в среде визуального моделирования *Simulink* [6] совместно с предложенными математическими моделями морского профилемера, параметры которых определены соотношениями (32) в статье [1].

На первом этапе моделировался процесс вывода профилемера на заданную глубину. При этом использовался закон управления в виде (7). Параметры регулятора вычислены с помощью формул (17), (18), (21) и имеют следующие значения:  $\lambda = 0,0000725$ ;  $k = 0,0713$ ;  $\alpha_0 = 0,000049$ ;  $\alpha_1 = 0,0127$ .

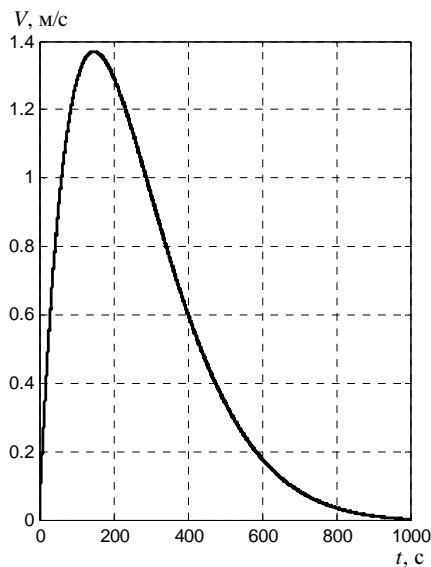
Объект управления и подключенный к нему адаптивный регулятор охвачены отрицательной обратной связью. Структурная схема моделирования замкнутой системы управления процессом погружения морского профилемера приведена на рис. 3. Результаты моделирования иллюстрируют рис. 4 и 5. На первом изображен график процесса погружения на заданную глубину 500 м. На втором – график изменения скорости погружения. Как видно из графиков, профилемер выходит на заданную глубину за требуемое время и с нулевой вертикальной скоростью.



Р и с. 3. Структурная схема моделирования управляемого процесса погружения морского профилемера

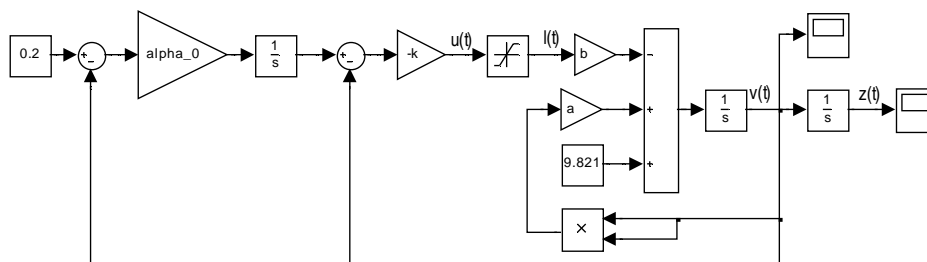


Р и с. 4. График процесса погружения профилемера на заданную глубину с нулевой вертикальной скоростью



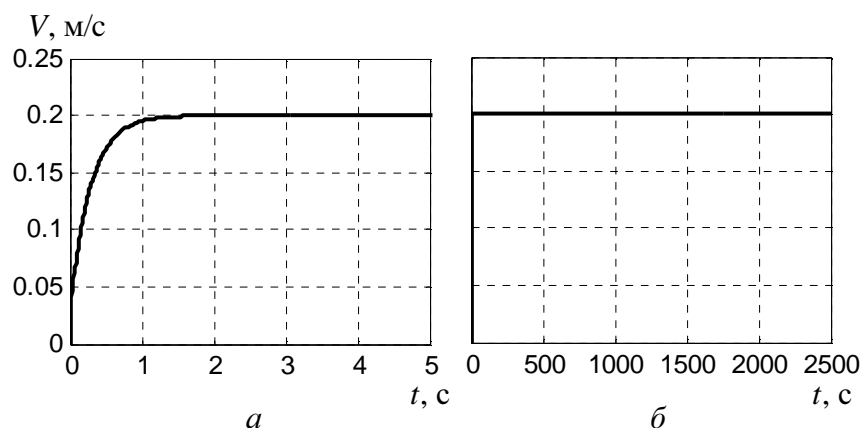
Р и с. 5. График скорости погружения морского профилемера

На втором этапе моделировался процесс управляемого движения профилемера при выполнении профильных измерений в режиме всплытия с начальной глубины 500 м с заданной постоянной скоростью 0,2 м/с. При этом использовалась «скоростная» модель профилемера (22) и адаптивный закон управления в виде (28). Структурная схема моделирования приведена на рис. 6. Параметры регулятора, вычисленные с помощью формул (29) для  $t_p = 2$  с и  $t_{pa} = 0,01t_p$ , имеют следующие значения:  $k = 0,24$ ;  $\alpha_0 = 2,33$ .



Р и с. 6. Структурная схема моделирования управляемого процесса всплытия морского профилемера с заданной постоянной скоростью при выполнении термохалинных измерений

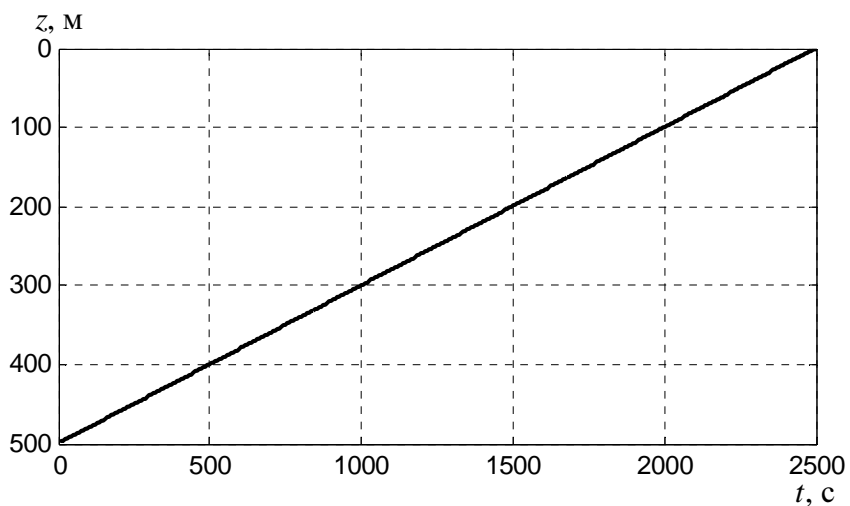
Графики скорости всплытия морского профилемера приведены на рис. 7, а на рис. 8 приведен график изменения глубины при выполнении профильных измерений.



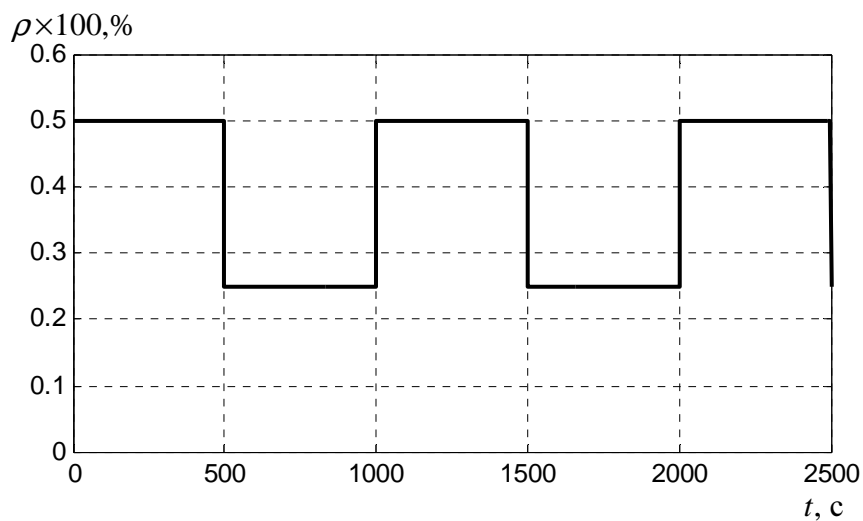
Р и с. 7. Графики скорости всплытия морского профилемера при выполнении измерений во время начальной фазы (а) и в установившемся режиме (б)

На третьем этапе выполнялось сравнительное моделирование управляемого и неуправляемого движений морского профилемера в режиме всплытия с одинаковой глубины (500 м), которое сопровождалось скачкообразным изменением вертикальной стратификации водной среды. При этом начальные состояния и объемы камер плавучести управляемого и неуправляемого про-

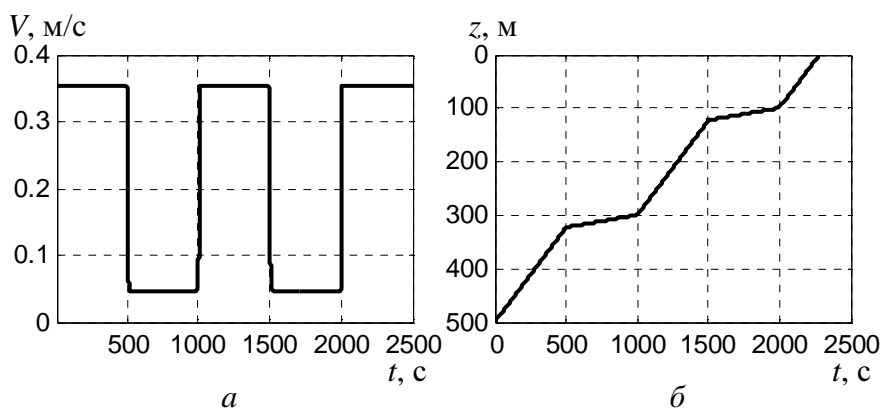
филемеров принимались одинаковыми. В качестве возмущающего воздействия рассматривалось гипотетическое скачкообразное изменение на 50% плотности морской воды (рис. 9). Изменения скорости и глубины при всплытии неуправляемого и управляемого профиломеров показаны соответственно на рис. 10 и 11.



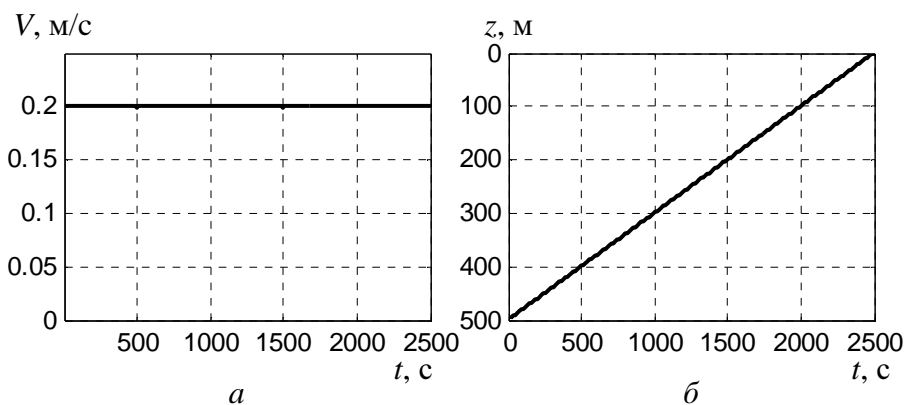
**Р и с. 8.** График изменения глубины при выполнении профильных измерений в режиме всплытия морского профиломера



**Р и с. 9.** График гипотетического скачкообразного изменения плотности морской воды



**Р и с. 10.** Графики изменения модуля скорости (а) и глубины (б) при неуправляемом всплытии профилера



**Р и с. 11.** Графики изменения модуля скорости (а) и глубины (б) при управляемом всплытии профилера

**Заключение.** Выполненные исследования показывают возможность повышения репрезентативности термохалинных измерений буйми-профилерами за счет управления скоростью движения по траектории. Система автоматического управления позволит с высокой точностью выводить буй-профиляр на заданную глубину с нулевой вертикальной скоростью за требуемое время. Это позволит выполнять синхронные измерения несколькими профилерами. Автоматическая стабилизация скорости движения буя-профилера относительно задаваемых расчетных величин снижает влияние инерционности датчиков на результаты измерений. Адаптивные свойства регулятора, управляющего плавучестью буя-профилера, позволяют устранять влияние возмущающих сил, вызванных неоднородностями водной среды, на параметры движения, которое можно формировать при помощи программного устройства в соответствии с выбранной методикой измерений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Краснодубец Л.А., Забурдаев В.И., Альчаков В.В.* Управление морскими буйми-профилемерами как метод повышения репрезентативности термохалинных измерений. Модели движения // Морской гидрофизический журнал. – 2012. – № 4. – С. 69 – 79.
2. *Крутько П.Д.* Новые технологии аналитического проектирования алгоритмического обеспечения систем управления движением // Управление, автоматизация и окружающая среда: Матер. междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 8 – 13 сентября 2008 г. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2008. – С. 4 – 24.
3. *Антонов В.Н., Терехов В.А., Тюкин И.Ю.* Адаптивное управление в технических системах. – СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 2001. – 244 с.
4. *Краснодубец Л.А.* Терминальное управление в морских наблюдательных системах с подвижными платформами сбора данных // Изв. РАН. Серия ТиСУ. – 2008. – № 2. – С. 141 – 153.
5. *Краснодубец Л.А.* Аналитическое конструирование адаптивных регуляторов на основе концепций обратных задач динамики и локальной оптимизации // Вестник СевНТУ. – Севастополь. – 2010. – Вып. 108. – С. 5 – 9.
6. *Гультияев А.* MATLAB. Имитационное моделирование в среде Windows: практическое пособие. – СПб.: Корона, 1999. – 288 с.

\*Севастопольский национальный технический университет  
E-mail: lakrasno@gmail.com  
alchakov@gmail.com

Материал поступил  
в редакцию 06.05.11  
После доработки 18.08.11

\*\*Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь  
E-mail: oaoimhi@inbox.ru

АНОТАЦІЯ Представлена робота є другою частиною статті тих саме авторів, виданої в «Морському гідрофізичному журналі» в № 4 за 2012 р. У ній виконано аналіз нелінійних диференціальних рівнянь, які описують процес управління гідрофізичним зондом із змінною плавучістю. Показана можливість ефективного управління швидкістю занурення (спливання) зонда з метою зменшення динамічної погрішності вимірювання внаслідок різної інерційності використовуваних первинних перетворювачів.

**Ключові слова:** буй-профилемер, профільні вимірювання, управління рухом, адаптивний регулятор, моделювання руху.

ABSTRACT The present work is the second part of the paper by the same authors published in «Marine Hydrophysical Journal», № 4, 2012. Non-linear differential equations describing the process of control of a hydrophysical probe with variable buoyancy are analyzed. Possibility of efficient control of the probe submergence (emergence) speed aimed at reducing the measurement dynamic error resulting from different inertance of the applied primary converters is shown.

**Keywords:** buoy-profilemeter, profile measurements, control of movement, adaptive regulator, modeling of movement.