

УДК 681.5

В.В. Альчаков, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет,

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 99053

E-mail: alchakov@mail.ru

**ПРИМЕНЕНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ НЫРЯЮЩИХ ДРИФТЕРОВ КАК СРЕДСТВО
ПОВЫШЕНИЯ РЕПРЕЗЕНТАТИВНОСТИ ПРОФИЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
МОРСКОЙ СРЕДЫ**

Рассматривается применение управляемых ныряющих дрифтеров с целью повышения репрезентативности профильных измерений. Обосновывается возможность эффективного управления скоростью погружения дрифтера с целью уменьшения динамической погрешности измерения вследствие инерционности используемых первичных преобразователей. Предлагается математическая модель, описывающая динамику погружения дрифтера с регулируемой плавучестью. Моделирование процесса неуправляемого погружения выполнено в Matlab.

Ключевые слова: ныряющий дрифтер, профильные измерения, модель погружения дрифтера.

Введение. Профильные измерения являются важной составной частью глобального мониторинга морской среды. В рамках этих измерений осуществляется регистрация вертикальной структуры полей температуры, солености, концентрации растворенного кислорода и прозрачности морской воды. Результаты измерений имеют большое значение в оценках тепло- и солезапаса, прогнозировании глобальных изменений климата, расчёте дальности действия гидролокационных систем, а также в оценке экологического состояния морей и океанов [1, 2].

В роли технических средств, обеспечивающих профильные измерения, выступают морские дрифтеры – подвижные платформы сбора данных, оснащенные набором датчиков для регистрации параметров морской воды, микропроцессорной системой, приемо-передающей системой космической связи [3]. Существующие модели ныряющих дрифтеров не способны регулировать скорость своего погружения при выполнении измерений, что негативно сказывается на их репрезентативности. Это объясняется тем, что неуправляемое погружение дрифтера осуществляется с постоянной скоростью порядка $[0,1 - 0,5]$ м/с, что может послужить причиной появления ошибок измерений тонких структур морской среды, вызванных инерционностью бортовых датчиков.

Обеспечить динамическое изменение скорости движения дрифтера в зависимости от заданной программы измерений можно за счет введения устройства управления (регулятора) в конструкцию дрифтера. Управляемая динамика дрифтера позволяет не только улучшить репрезентативность измерений, но и открывает новые возможности использования дрифтеров для различных научно-технических задач. В частности, становится возможным выполнение синхронных манёвров группировкой дрифтеров, расположенных в некотором морском регионе. При этом для каждого дрифтера, входящего в группировку, могут быть обеспечены равные скорости погружения или всплытия, или достижение заданного горизонта дрейфа за установленное время, что на сегодняшний день является нерешённой задачей.

Цель работы состоит в создании математической модели морского ныряющего дрифтера и исследовании на её основе динамики погружения дрифтера в морской среде.

1. Обзор технических средств для выполнения профильных измерений. В роли технических средств, обеспечивающих профильные измерения, выступают морские профиломеры – подвижные платформы сбора данных, конструктивно выполненные в форме морских буйев. Измерения, выполняемые с помощью профиломеров типа SBE9+, SBE25 и Mark-IIIC, проводятся с борта научно-исследовательских судов (рисунок 1).

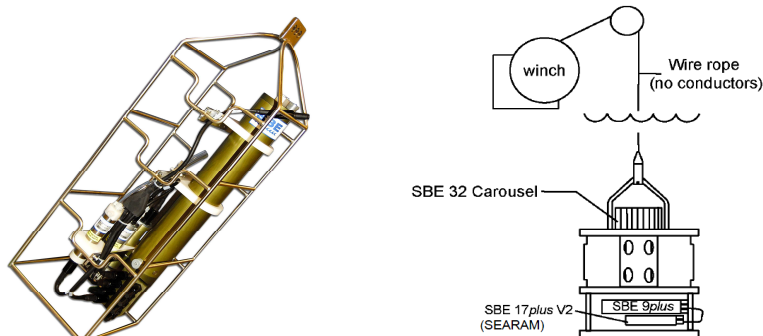


Рисунок 1 – Профиломер SBE и схема его использования

В процессе измерений профиломер жестко связан с бортом судна с помощью кабель-троса, в результате чего возможно возникновение погрешностей измерений, вызванных качкой судна.

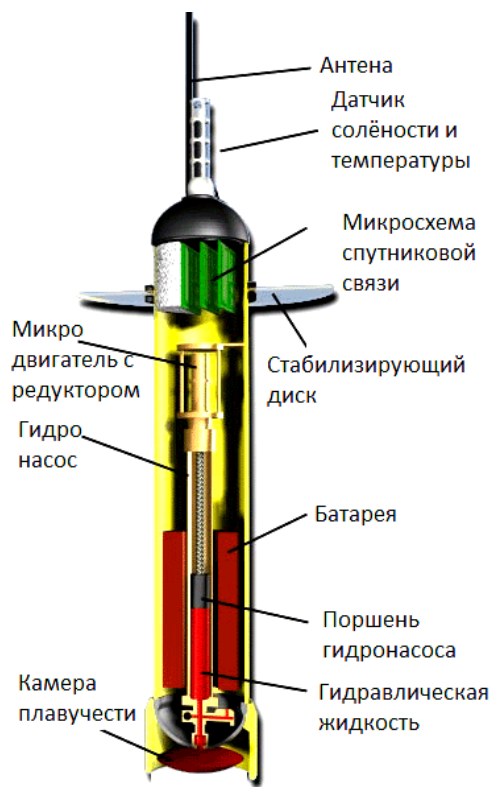


Рисунок 2 – Модель дрейфтера ARGO

Указанного недостатка лишены морские автономные дрейфтеры проекта ARGO, используемые в том числе и для задач профильных измерений (рисунок 2). Конструкция дрейфтеров типа APEX, PROVOR, SOLO, NINJA представляет собой корпус цилиндрической формы, внутри которого расположены микросхемы связи и сбора данных, батарея автономного питания, система изменения плавучести. Корпус оснащен диском стабилизации, что позволяет дрейфтеру принимать вертикальное положение при передаче данных на поверхности и замедляет скорость погружения, а также антенной космической связи и набором датчиков, осуществляющих регистрацию величин, характеризующих солёность и температуру морской воды в текущей точке Мирового океана. Погружение и всплытие данного вида устройств осуществляется за счет изменения плавучести относительно нейтрального состояния (нулевой плавучести). Это изменение достигается тремя различными способами.

В моделях типа APEX плавучесть изменяется в процессе перекачивания гидравлической жидкости с помощью гидронасоса, расположенного внутри корпуса дрейфтера, в специализированную камеру плавучести переменного объема, расположенную в его нижней части. При этом возникает изменение выталкивающей – Архимедовой силы, в результате чего изменяется равнодействующая сил,

действующих на дрейфтер, и осуществляется погружение или всплытие. В моделях типа NINJA привод электромотора запускает механизм, увеличивающий объем дрейфтера за счет телескопического выдвижения дополнительной цилиндрической части. И, наконец, третий тип PROVOR использует тот же принцип перекачивания гидравлической жидкости из внутреннего резервуара во внешнюю камеру плавучести, однако для этого применяется более сложный гидравлический привод с перепускным клапаном и насосом, а также используется разделение каналов: 1) канал по которому гидравлическая жидкость нагнетается в камеру плавучести; 2) канал для перекачивания гидравлической жидкости из камеры плавучести обратно в резервуар (рисунок 3).

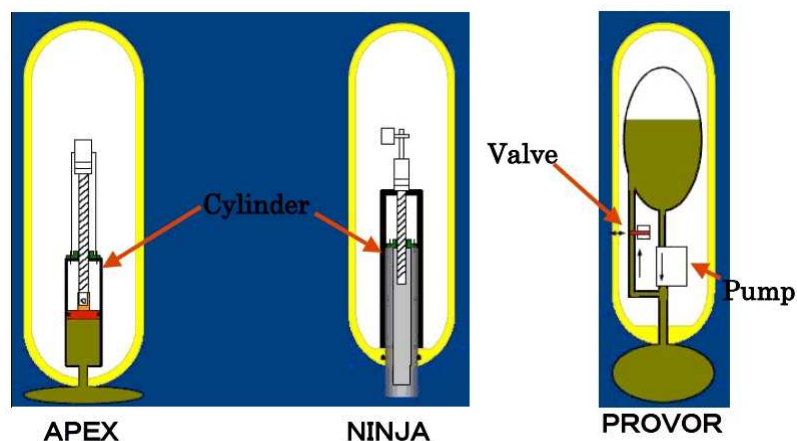


Рисунок 3 – Принцип изменения плавучести в различных типах дрейфтеров

Основной недостаток дрейфтеров представленного типа состоит в том, что погружение и всплытие может происходить с нерегулируемой постоянной скоростью, при этом возможно возникновение погрешностей, вызванных ввиду значительной инерционности датчиков, осуществляющих регистрацию температуры или солёности при прохождении тонких структур океанской среды. Устранить данный недостаток можно за счет использования контура управления, который позволит изменять плавучесть в зависимости от заданной программы погружения.

Далее рассмотрено построение математической модели, описывающей динамику погружения дрейфтера АРЕХ с устройством изменения плавучести первого типа.

2. Математическая модель дрейфтера, выполняющего погружение. При движении в вертикальной плоскости на дрейфтер действуют следующие силы: F_ρ – выталкивающая или Архимедова сила (направлена вертикально вверх); F_c – сила гидродинамического сопротивления (направлена в сторону, противоположную движению); P – вес дрейфтера (направлен вертикально вниз). Направление действия сил представлено на рисунке 4. При этом движение вниз принято за положительное направление. В соответствии со вторым законом Ньютона динамика объекта описывается уравнением

$$m\vec{a} = \sum \vec{F}, \quad (1)$$

где m – масса объекта, $\vec{a}$ – ускорение объекта, $\sum \vec{F}$ – результирующая сил, действующих на объект.

Будем считать, что движение профиломера происходит в морской воде, плотность которой постоянна, тогда выталкивающая сила может быть задана соотношением

$$F_\rho(t) = \rho_\phi V_\phi(t)g, \quad (2)$$

где ρ_ϕ – плотность морской воды; $V_\phi(t)$ – переменный объем дрейфтера, g – ускорение свободного падения.

Переменный объем $V_\phi(t)$ представим как сумма составляющих – постоянной и переменной, а именно

$$V_\phi(t) = V_\phi^0 + V_{\kappa n}(t), \quad (3)$$

где V_ϕ^0 – номинальный объем корпусной части дрейфтера; $V_{\kappa n}(t)$ – объем камеры плавучести.

Сила гидродинамического сопротивления вычисляется из соотношения

$$F_c(t) = \frac{C_x S \rho_\phi}{2} \dot{z}^2(t), \quad (4)$$

где C_x – коэффициент гидродинамического сопротивления; S – площадь поперечного сечения корпуса дрейфтера (миделево сечение); $\dot{z}(t)$ – скорость погружения дрейфтера.

Для вычисления веса воспользуемся уравнением

$$P = mg, \quad (5)$$

где m – постоянная масса дрейфтера.

Подставив (2) – (5) в (1) и, обозначив $a = \ddot{z}$, получим уравнение

$$m\ddot{z}(t) = mg - \frac{C_x S \rho_\phi}{2} \dot{z}^2(t) - \rho_\phi g (V_\phi^0 + V_{\kappa n}(t)). \quad (6)$$

После преобразований следует:

$$\ddot{z}(t) + \frac{C_x S \rho_\phi}{2m} \dot{z}^2(t) = g - \frac{\rho_\phi g}{m} V_\phi^0 - \frac{\rho_\phi g}{m} V_{\kappa n}(t). \quad (7)$$

Далее, положим $\dot{z}^2(t) = \dot{z}_{cp} \dot{z}(t)$, где $\dot{z}_{cp}$ – средняя скорость погружения дрейфтера. В таком случае (7) может быть переписано в виде

$$\ddot{z}(t) + a_1 \dot{z}(t) = -a_0 - b V_{\kappa n}(t), \quad (8)$$

где $a_1 = \frac{C_x S \rho_\phi \dot{z}_{cp}}{2m}$, $a_0 = \frac{\rho_\phi g}{m} V_\phi^0 - g$, $b = \frac{\rho_\phi g}{m}$.

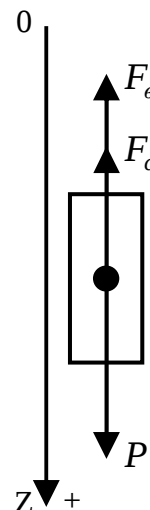


Рисунок 4 – Система сил, действующих на дрейфтер при погружении

Переменный объем камеры плавучести $V_{\kappa n}(t)$ выступает в качестве управляющего воздействия. Принимая во внимание, что объем камеры плавучести зависит от положения поршня насоса, управляемого электрогидравлическим приводом, можно записать выражение для объема камеры плавучести как функцию времени

$$V_{\kappa n}(t) = l(t)S_c, \quad (9)$$

где $l(t)$ – линейное перемещение поршня насоса $0 \leq l(t) \leq l_{\max}$; S_c – площадь цилиндра, в котором движется поршень. Будем считать, что нейтральная плавучесть достигается при $l(t) = \frac{l_{\max}}{2}$.

Так как перемещение поршня осуществляется под действием электрогидравлического привода, то, пренебрегая постоянной времени, дифференциальное уравнение движения поршня можно записать в виде

$$\dot{l}(t) = k_{\text{эп}}(u(t) - k_{\text{ос}}l(t)), \quad (10)$$

где $k_{\text{эп}}$ – коэффициент усиления электрогидравлического привода; $k_{\text{ос}}$ – коэффициент обратной связи; $u(t)$ – управляющее напряжение.

С учетом (9) и (10) уравнение, описывающее динамику погружения дрифттера (8), примет вид

$$\begin{cases} \ddot{z}(t) + a_1\dot{z}(t) + a_0 = -b_0l(t) \\ \dot{l}(t) = k_{\text{эп}}(u(t) - k_{\text{ос}}l(t)) \end{cases}, \quad (11)$$

где $b_0 = \frac{\rho_g g S_c}{m}$.

После замены переменных $x_1(t) = z(t)$, $x_2(t) = \dot{z}(t)$, $x_3(t) = l(t)$ систему (11) можно переписать в виде

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = -a_1x_2(t) - b_0x_3(t) - a_0 \\ \dot{x}_3(t) = -k_{\text{ос}}x_3(t) + k_{\text{эп}}u(t) \end{cases}. \quad (12)$$

Линейная модель (12) использована для исследования динамики погружения дрифттера и для синтеза законов управления глубиной и скоростью погружения.

3. Моделирование погружения дрифттера. При моделировании погружения дрифттера были приняты следующие численные значения параметров модели (таблица 1)

Таблица 1 – Численные значения параметров модели

Наименование	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Плотность морской воды при 25 °С	ρ_g	1024,12	кг/м ³
Ускорение свободного падения	g	9,81	м/с ²
Номинальный объем корпусной части дрифттера	V_{θ}^0	0,0283	м ³
Коэффициент гидродинамического сопротивления	C_x	1	–
Масса дрифттера	m	30	кг
Миделево сечение	S	0,1521	м ²
Средняя скорость погружения	$\dot{z}_{cp}$	0,1	м/с
Максимальное линейное перемещение поршня насоса	$l_{\max}$	0,5	м
Площадь цилиндра, в котором движется поршень	S_c	0,0015	м ²
Коэффициент усиления электрогидропривода	$k_{\text{эп}}$	0,5	–
Коэффициент обратной связи	$k_{\text{ос}}$	1	В/м

Моделирование системы выполнено в пакете Matlab с использованием подсистемы Simulink. Структурная схема модели, соответствующей системе (11), приведена на рисунке 5, а соответствующие ей результаты моделирования на рисунке 6.

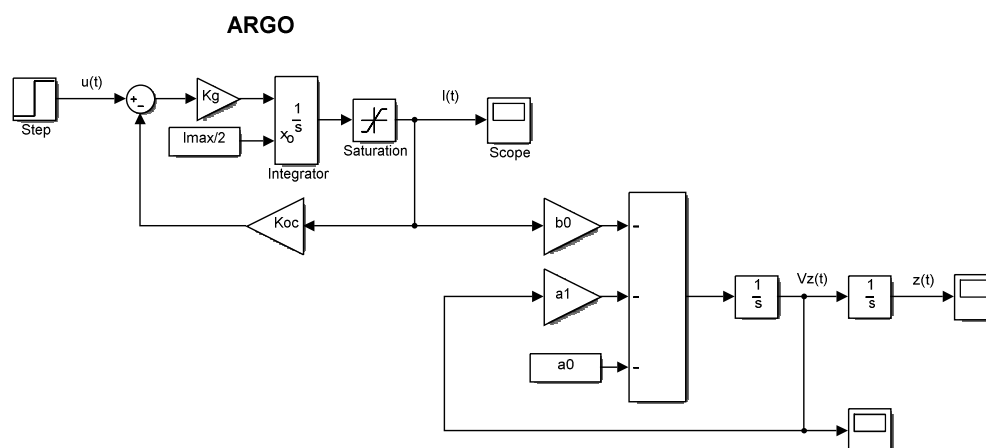
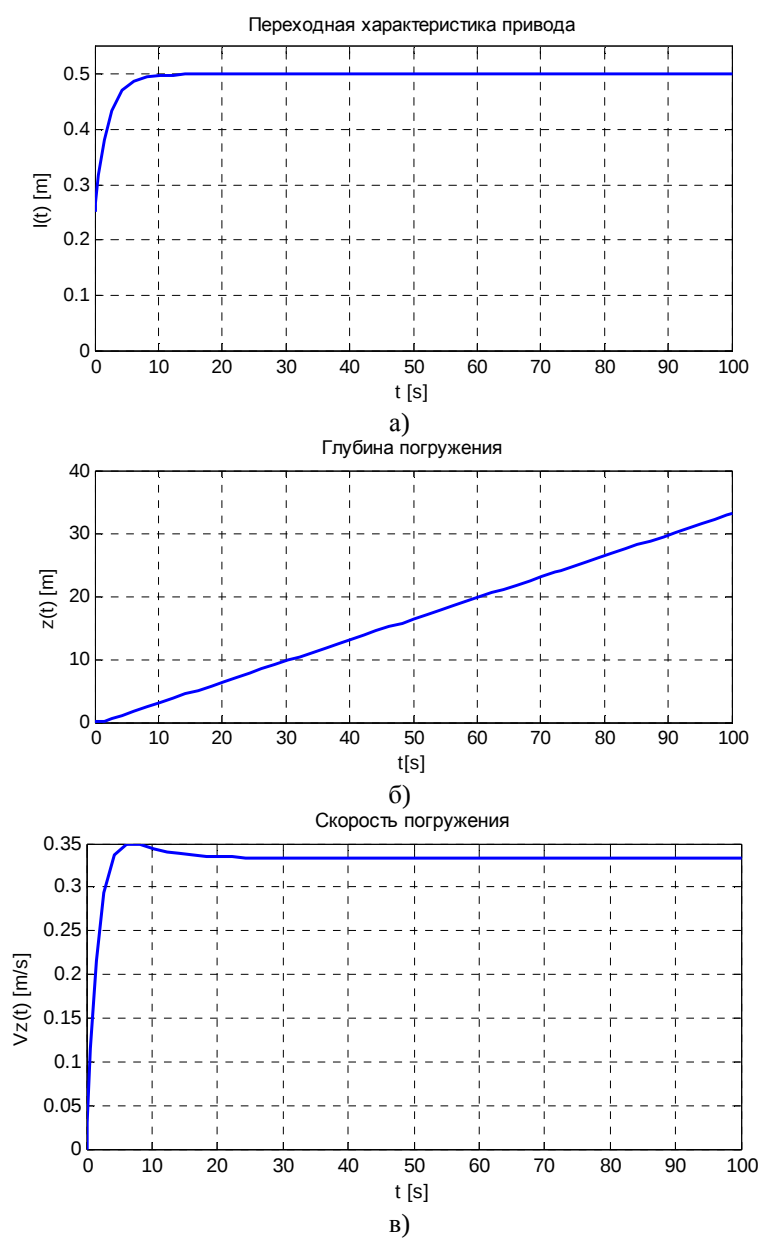


Рисунок 5 – Simulink модель погружения дрифтера

Рисунок 6 – Результаты моделирования: а) переходная характеристика привода;
б) глубина погружения; в) скорость погружения

Из результатов моделирования следует, что средняя скорость погружения дрейфера составляет порядка 0,33 м/с, что близко к средней скорости реального прототипа.

Заключение. Существующие модели глубоководных автономных дрейферов не позволяют выполнять сложные программы профилейных измерений ввиду отсутствия бортовых систем управления, обеспечивающих погружение и всплытие дрейфера с постоянной скоростью. Повысить эффективность использования данного класса устройств возможно за счет оснащения существующих моделей дополнительными блоками управления плавучестью. В работе получена математическая модель погружения дрейфера в вертикальной плоскости, которая применима при синтезе регуляторов плавучести.

Перспективы дальнейших исследований состоят в разработке специализированных алгоритмов и законов управления, обеспечивающих погружение дрейфера с заданной скоростью, а также достижение заданной глубины погружения за установленный интервал времени.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и г. Севастополя в рамках научного проекта 14-48-01598 «р_юг_а»

Библиографический список использованной литературы

1. Смирнов Г.В. Океанология: средства и методы океанологических исследований / Г.В. Смирнов, В.Н. Еремеев, М.Д. Агеев, Г.К. Коротаев, В.С. Ястребов, С.В. Мотыжев. — М.: Наука, 2005. — 795 с.
2. Лазарюк А.Ю. Устранение динамических погрешностей данных СТД измерения в океане / А.Ю. Лазарюк, В.И. Пономарев // Вестник ДВО РАН. 2006. №4 — С. 106 – 111.
3. Краснодубец Л.А. Терминальное управление в морских наблюдательных системах с подвижными платформами сбора данных // Изв. РАН. Серия ТиСУ. — 2008. №2. — С. 141. – 153.

Поступила в редакцию 14.10.2014 г.

Альчаков В.В. Застосування керування пірнаючих дрейферів як засіб підвищення репрезентативності профільних вимірів морського середовища

Розглядається застосування керування пірнаючих дрейферів з метою підвищення репрезентативності профільних вимірів. Обґрунтовується можливість ефективного керування швидкістю занурення дрейфера з метою зменшення динамічної погрешності виміру внаслідок інерційності використовуваних первинних перетворювачів. Пропонується математична модель, що описує динаміку занурення дрейфера з регульованою плавучістю. Наводяться результати моделювання процесу некерованого занурення в пакеті Matlab.

Ключові слова: пірнаючий дрейфер, профільні виміри, модель занурення дрейфера.

Alchakov V.V. The application of profiling drifters that controlled for increasing the representativeness of profile measurements

The possibility of effectively controlling the speed of dive drifter to reduce the dynamic measurement error due to the inertia of the primary converters used. A mathematical model describing the dynamics of immersion drifter with adjustable buoyancy is reviewed. The results of the modeling process of uncontrolled dive package Matlab are provided

Keywords: diving drifter, profile measurement, model of diving drifter.