

МОРСКОЙ АВТОНОМНЫЙ ПРОФИЛОГРАФ С УПРАВЛЯЕМОЙ ПЛАВУЧЕСТЬЮ

Л.А. Краснодубец, Д.А. Дьяченко, В.С. Кулик

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
E-mail: lakrasno@gmail.com

Рассматривается новый класс морских профилографов, предназначенных для высокоточных измерений термохалинных параметров вертикальных профилей морской среды с целью определения её тонкой структуры.

Ключевые слова: морской автономный профилограф, платформа сбора данных, стратификация, управление плавучестью, линейный электрический двигатель.

Введение. В практике морских гидрофизических исследований особое место занимают профильные измерения, включающие определение электропроводности, температуры и давления (глубины). В специальной научной литературе такие измерения называют термохалинными, а платформу с соответствующими измерительными приборами называют *CTD-зондом* (*conductivity, temperature and depth probe*), или профилографом (*profiler*). В качестве платформ сбора данных для профильных измерений широко применяются морские буи, которые тяжелее воды, то есть обладают отрицательной плавучестью. Такие аппараты чаще всего опускаются в глубину на тросах-подвесах, что при волнении приводит к появлению существенных погрешностей. Для исключения таких погрешностей используют буи одноразового применения, соединенные с судном носителем тонким проводом, обеспечивающим информационную связь. При этом существенным недостатком такого способа профилирования является не только его одноразовый режим применения, но и выполнение профильных измерений только в режиме погружения в условиях сопровождения зондов судами, обеспечивающими проведение исследований. Это ограничивает количество станций и возможности получения данных о текущем состоянии толщи водной среды для мониторинга широкомасштабных процессов перемещения

тепла в океане для прогноза погоды и климатических исследований.

Применение морских автономных буев с переменной плавучестью и значительным жизненным циклом (до 4 лет) для исследования структуры глубоководных течений и гидроакустической разведки (до 2000 м) в Мировом океане решило проблему крупномасштабных климатических исследований. С помощью этих свободно плавающих ныряющих буев (ныряющих дрифтеров) возможно исследование вертикальной структуры полей температуры, солености, концентрации растворенного кислорода, прозрачности, что имеет большое значение в оценках тепло и солезапаса, их изменчивости и взаимосвязи с глобальными изменениями климата, а также в оценке экономического состояния водной массы Мирового океана.

В настоящее время для измерения вертикальной структуры океанской среды в глобальных масштабах широко используются ныряющие буи класса *Argo* [1], которые называют профилографами. Они выпускаются несколькими производителями и обладают примерно одинаковыми техническими характеристиками. Модели *APEX* и *SOLO* производятся в США, *PROVOR* – во Франции, *NINJA* – в Японии. В Китае так же проведены испытания подобных устройств собственной разработки [2]. Установленная на этих буях система автоматического управления состоит из контролле-

ра, управляющего электроприводом механического устройства, изменяющего плавучесть буя за счет изменения выталкивающей силы. Такая система управления обеспечивает многократное погружение и всплытие, а также стабилизацию относительно заданной глубины, достижение которой осуществляется с постоянной скоростью порядка 0,1 м/с. Это позволяет использовать буи класса *Argo* в качестве автономных профилографов, которые большую часть времени используются в роли подводных дрифтеров, свободно плывущих в толще воды на заданной глубине вместе с течением и таким образом перемещающихся от одной станции измерения профиля к другой. Горизонт дрейфа устанавливается при запуске с помощью специального компьютера и остается неизменным в течение некоторого заданного программой исследований времени (иногда всего времени существования буя). Оснащаются буи *Argo* спутниковой системой связи *Argos*, которая обеспечивает их позиционирование на морской поверхности, а также передачу и распространение потребителям накопленных в ходе измерений данных. Профильные измерения буи класса *Argo* выполняют только в режиме всплытия и с постоянной скоростью порядка 0,1 м/с. При этом формируются массивы термохалинных данных вертикального профиля с разрешением по глубине до 10 м, что является недостаточным для обнаружения тонкой слоистой структуры, толщина слоев которой может достигать нескольких сантиметров [3].

Изменчивость температуры и солености значительно возрастает в верхнем слое океана и особенно в термоклине, в связи с чем для снижения динамических ошибок из-за инерционности первичных измерительных преобразователей температуры, возникает задача оперативного управления скоростью всплытия буя в области глубин с максимальными вертикальными градиентами по температуре с целью существенного снижения динамической погрешности [4] и повышения разрешения по глубине термохалинных

измерений. Решение этой задачи требует использования регуляторов плавучести с высоким быстродействием, что, в свою очередь, приводит необходимости разработки новых сверхбыстродействующих электроприводов, способных работать в автономных подводных устройствах. Профилографы класса *Argo* не обладают такими способностями.

При решении крупномасштабных задач исследования термохалинных циркуляций [5] на основе измерений вертикальной структуры океанических вод может потребоваться обеспечение синхронности регистрации данных, получаемых в определенном ареале Мирового океана при помощи распределенной группировки буев-профилографов. В таком случае необходимо управлять процессами измерений путем использования режима стабилизации равных скоростей всплытия (погружения) профилографов, что невозможно осуществить без регулирования скорости движения в морской среде каждого отдельного буя. Специфические свойства ныряющих буев как объектов управления, на базе которых строят автономные профилографы, 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 автономным профилографом во время его погружения или всплытия. Поэтому проблему решения эффективного управления автономным профилографом, выполняющим высокоточные измерения тонкой структуры океанской среды [3], можно решить путем разработки адаптивных быстродействующих электроприводов в составе мехатронных систем регулирования плавучести.

Принцип построения механического устройства регулирования плавучести демонстрируется на рис. 1, где

приняты следующие обозначения: 1 – корпус профилографа; 2 – шток; 3 – поршень; 4 – камера плавучести; 5 – гидравлическая жидкость.

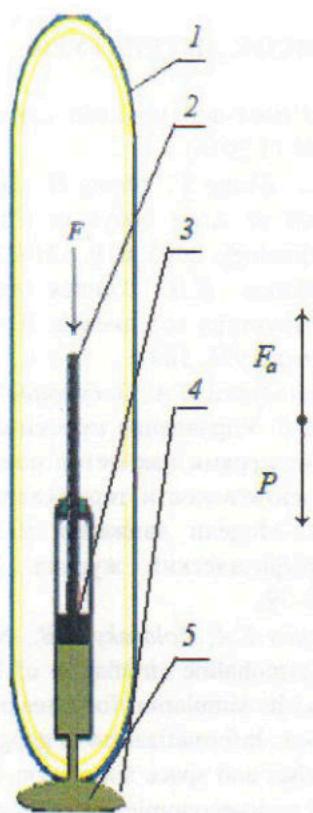


Рис. 1. Схема механического регулятора плавучести

Механическое устройство регулирования плавучести работает следующим образом. Сила F , приложенная к штоку 2, соединенному с поршнем 3, действует в направлении, указанном стрелкой, вызывая перемещение поршня 3, который выдавливает гидравлическую жидкость 5 из корпуса 1 в камеру плавучести 4, выполненную из эластичного материала. При этом камера плавучести расширяется и ее объем увеличивается, что приводит к увеличению общего объема всей корпусной части профилографа. Это в соответствии с законом Архимеда обеспечивает увеличение выталкивающей силы F_a , направленной встречно силе тяжести P . При выполнении равенства $F_a = P$ профилограф обретает нулевую (нейтральную) плавучесть. Та-

ким образом, перемещая шток вверх или вниз, можно регулировать величину выталкивающей силы и, тем самым, обеспечивать нужный скоростной режим погружения или всплытия профилографа. В современных автономных профилографах типа *APEX*, относящихся к классу *Argo*, шток приводится в движение при помощи электропривода постоянного тока, через винтовую механическую передачу. Аналогичный привод применяется в профилографах *NINJA*, но объем корпусной части изменяется за счет выдвижения поршня из корпуса без использования гидравлической жидкости. В автономных профилографах типа *PROVOR* эластичная камера плавучести наполняется гидравлической жидкостью при помощи насоса.

Судя по доступным источникам [6, 7], регуляторы плавучести, применяемые в автономных профилографах класса *Argo*, обладают большой инерционностью, запаздыванием и существенно нелинейными характеристиками, которые особенно ярко проявляются при реверсных режимах. Это объясняется известными недостатками, присущими электрогидравлическим системам с насосами и электромеханическим системам с винтовыми и редукторными передачами. Отмеченные недостатки не являются серьезными для приведения плавучести к необходимым значениям для погружения или всплытия с неконтролируемой вертикальной скоростью. Однако, если в процессе профилирования в стратифицированной водной среде необходимо поддерживать постоянную скорость движения, то решение этой задачи возможно только путем создания быстрореагирующих реверсивных электроприводов, способных с большими линейными скоростями и усилиями осуществлять с минимальными проявлениями нелинейных эффектов и трения передачу движения от исполнительного двигателя к механическим элементам устройства регулирования плавучести.

Современный электропривод на базе линейного двигателя (ЛД) постоянного тока свободен от отмеченных недостатков традиционных электроприводов, применяемых совместно с меха-

ническими устройствами регулирования плавучести. В электроприводах с ЛД отсутствуют механические редукторы и винтовые передачи – источники нелинейных эффектов и сил трения. По этой причине такие приводы обладают невиданными ранее динамическими характеристиками и высоким КПД (до 90%), так как в них силовое электромагнитное поле напрямую преобразуется в механическую энергию. Они могут обеспечить скорость перемещения штока до 15 м/с, а ускорение до 20 г. Осевое усилие промышленных ЛД составляет от нескольких Н до десятков кН. Существующие конструкции ЛД позволяют удобно разместить их в цилиндрическом корпусе профилографа и соединить выходной шток непосредственно со штоком механического регулятора плавучести без промежуточных элементов механической передачи. При этом реверс перемещения штока для изменения знака приращения выталкивающей силы осуществляется практически мгновенно, что имеет большое значение для управления скоростью профилографа.

Заключение. Обнаружение и измерение тонкой структуры океанских вод в планетарных масштабах имеет практическое значение для развития современной климатологии в направлении усвоения огромных массивов прямых измерений термохалинных профилей океанских вод. Решение этой задачи содержится в техническими характеристиками современных автономных профилографов в части динамики их управляемого движения, которые не позволяют обнаруживать термохалинную структуру с толщиной менее 10 м. Актуальной явля-

ется разработка на основе ЛД сверхбыстро действующего электропривода для мехатронной системы управления плавучестью морского автономного профилографа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www-argo.ucsd.edu> (дата обращения: 04.11.2016).
2. Yu L., Zhang S., Shang H. Design and research of Argo buoys in China // Marine Technology. 2005. 6. P. 121–129.
3. Федоров К.Н. Тонкая термохалинная структура вод океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 184 с.
4. Краснодубец Л.А., Забурдаев В.И., Альчаков В.В. Управление морскими буями профилемерами как метод повышения репрезентативности термохалинных измерений. Модели движения // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 4. С. 69–79.
5. Baziura E.A, Polonsky A.B., Sannikov V.F. Termohaline circulation of North Atlantic and its simulation for a recent climate. In book: Informatization of geographical researches and space simulation of the natural and socio-economic systems / ed. by V.M. Kotliakov. MAAK-RAS, Moscow, 2013. P. 256–270.
6. Wang S., Wu A. Application of hydraulic technology in ARGO buoy // Fluid Power Transmission and Control, 2010. P. 37–40.
7. Liu Y., Guo Z., Zhu B. Underwater tool system driven by seawater hydraulic // Marine Technology. 2006. No 12. P. 65–69.

THE SEA AUTONOMOUS PROFILER WITH CONTROLLED BUOYANCY

L.A. Krasnodubets, D.A. Djachenko, V.C. Kulik

Sevastopol State University, Russian Federation, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

The new class sea profiler, intended for high-precision measurements thermohaline parameters of vertical profiles of the sea environment for the purpose of definition of its thin structure is considered.

Keywords: sea autonomous profiler, data collection platform, stratification, control of buoyancy, linear electric machine.