

М.Ю. Григоров, Т.Б. Егорова, В.Н. Зайцев, Б.М. Зеленский, В.В. Тюшкевич
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

АЛГОРИТМ СОГЛАСОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ КОНДЕПАМИ ПРОТЯЖЕННОЙ БУКСИРУЕМОЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНОЙ АНТЕННЫ

Объект и цель научной работы. Объектом работы является система управления протяженной геологоразведочной антенной, буксируемой в своем рабочем режиме, т.е. движущейся на прямом курсе и проводящей сканирование морского дна. Цель состоит в разработке эффективного алгоритма согласованного управления всей совокупностью кондепов антенны для обеспечения заданного коридора ее движения по глубине.

Материалы и методы. С учетом физических особенностей поведения геологоразведочной антенны в рабочем режиме движения проводится линеаризация уравнений динамики протяженных связей, определяется математическая модель динамики антенны, имеющей в своем составе совокупность кондепов, и после анализа структуры возмущающих сил отбрасываются несущественные компоненты возмущения. Оставшиеся значимые компоненты возмущающих сил принимаются во внимание при разработке алгоритма согласованного управления кондепами антенны, опирающегося на численное решение последовательного ряда нелинейных краевых задач для каждой секции антенны между кондепами и на определение потребных управляющих сил для всех кондепов с учетом изменяющихся натуральных условий.

Основные результаты. Получен и обоснован эффективный алгоритм согласованного управления кондепами геологоразведочной антенны, решающий задачу движения кондепов в рабочем режиме в заданном коридоре глубин с учетом основных возмущающих факторов. Характерной особенностью разработанного алгоритма управления является минимальная потребная затрата энергии аккумуляторов кондепов косы геологоразведочной антенны.

Заключение. Проведенные теоретические исследования позволили разработать корректную математическую модель динамики геологоразведочной антенны, имеющей в своем составе совокупность кондепов, опираясь на которую был создан алгоритм согласованного управления всеми кондепами. Рассмотренный в статье вариант алгоритма управления совокупностью кондепов предполагает, что система автоматического управления должна находиться на судне-буксировщике в единственном числе для всей косы антенны, удобна для практической реализации и не требует для своей работы формирования сложного управляющего, многофакторного сигнала.

Ключевые слова: гибкая протяженная буксируемая гидроакустическая антенна, форма, управление, кондеп.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Григоров М.Ю., Егорова Т.Б., Зайцев В.Н., Зеленский Б.М., Тюшкевич В.В. Алгоритм согласованного управления кондепами протяженной буксируемой геологоразведочной антенны. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 1(383): 81–88.

УДК 621.396.67

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-81-88

M. Grigorov, T. Yegorova, V. Zaitsev, B. Zelensky, V. Tyushkevich
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

COORDINATED CONTROL ALGORITHM FOR CONDEPS OF LONG TOWED STREAMER ARRAY FOR GEOLOGICAL SURVEYS

Object and purpose of research. This paper studies control system of long streamer array for geological surveys, towed in its typical operational conditions, i.e. at straight course, and scanning the seabed. The purpose is to develop an efficient algorithm for coordinated control over the whole totality of the array's constant-depth control modules (condeps) to ensure its movement within specified depth range.

Materials and methods. Taking into account physical peculiarities of geological-survey streamer behavior in its operational conditions, dynamic equations of long lines are linearized, so as to develop the mathematical model of an array consisting of a number of condeps, and then, after the structure of exciting forces is analysed, insignificant components of excitation are neglected. The remaining, significant, components of exciting forces are taken into account in development of coordinated control algorithm for the array's condeps, based on numerical solution of a number of non-linear boundary problems for each section of the array between condeps, as well as based on required controlling forces determined for all condeps taking into account variable full-scale conditions.

Main results. This study yielded and justified an efficient algorithm for coordinated condep control of geological-survey streamer array, solving the problem of condep movement in operational conditions at specified depth range taking into account key exciting factors. A typical peculiarity of this algorithm is mitigation of power demand for streamer condep batteries.

Conclusion. Theoretical studies performed during this work made it possible to develop a correct mathematical model for dynamics of geological-survey streamer array with a number of condeps, and based on this model, coordinated control algorithm for all these condeps has been developed. The variant of the control algorithm discussed in this paper implies that automatic control system must be located aboard the towing ship and must handle the whole streamer of the array. This system would be convenient for practical implementation and would not require a complex multi-factor control signal for its operation.

Key words: flexible long towed sonar array, shape, control, condep.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Grigorov M., Yegorova T., Zaitsev V., Zelensky B., Tyushkevich V. Coordinated control algorithm for condeps of long towed streamer array for geological surveys. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 1(383): 81–88 (in Russian).

УДК 621.396.67

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-81-88

В 80-е гг. прошлого века в западных странах, прежде всего в США, Франции и Норвегии, активно разрабатывались средства морской геологоразведки полезных ископаемых с помощью гидроакустических протяженных буксируемых антенн (ГПБА). Работы по созданию таких стратегически важных систем были начаты и в СССР с привлечением ряда предприятий судостроительной промышленности, в том числе ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Однако в 90-е гг. финансирование этих работ прекратилось. Одной из причин стало крайне недалекое решение геологоразведчиков полностью перейти на использование ГПБА иностранного производства.

Сегодня, в связи с антироссийскими санкциями, интерес к созданию отечественных систем морской геологоразведки с использованием ГПБА резко повысился. При этом выяснилось, что в РФ далеко не полностью решены проблемы управления формой ГПБА, буксируемой в рабочем режиме, когда производится сканирование морского дна.

Оптимальной формой гидроакустической антенны при буксировке является горизонтальная линия. Однако типичная особенность ГПБА состоит в том, что антенна по технологическим причинам и для удобства обслуживания имеет небольшую положительную плавучесть. В настоящее время погонная величина положительной плавучести обычно равна 0,05–0,15 Н/м. Положительная пла-

вучесть вызывает определенное отличие формы антенны от прямой линии, и этим обусловлено включение в состав антенны средств активного управления ее формой.

Определение параметров антенны, включая ее форму, в условиях стационарного и нестационарного возмущения является достаточно трудоемкой задачей. Возникающие при решении этой задачи сложности и различные методы их преодоления рассмотрены в работах [1–7]. Вопросам разработки эффективных методов управления глубиной погружения сейморазведочной антенны посвящена работа [8]

Основным средством обеспечения оптимальной формы гидроакустической антенны при ее движении на заданной глубине являются модули механического управления глубиной. В практике проектирования гидроакустических антенн их обычно называют кондепами – от английского «constant depth». В состав комплекса ГПБА обычно входит целый ряд протяженных рабочих линий антенны, называемых косами. На каждой из них требуется установить относительно много кондепов, чтобы средняя форма линии не выходила за определенный диапазон глубины движения.

Кондеп представляет собой навешиваемый на гидроакустическую антенну небольшой хорошо обтекаемый корпус с горизонтальными крыльями, призванными обеспечивать движение кондепа на задан-

ной глубине. В зависимости от угла атаки этих крыльев изменяется вертикальная сила, действующая на косу ГПБА, что приводит к изменению глубины ее движения. Обычно кондепы снабжаются автономными системами управления углом перекладки крыльев. На рис. 1 представлен общий вид модели одного из вариантов построения кондепа.

Информация о форме каждой косы ГПБА поступает на судно-буксировщик в виде массивов глубин, на которых идут кондепы, а также углов перекладки крыльев кондепов. Форма гидроакустической антенны считается соответствующей заданной, если все кондепы идут на заданных глубинах.

Первоначально считалось, что обеспечить требуемую форму каждой косы ГПБА можно за счет управления глубиной хода кондепов с помощью встроенных систем автономного управления, опирающихся на определенные датчики кондепов их глубины движения. Теоретически казалось вполне возможным управлять движением каждого изолированного кондепа, опираясь только на информацию об изменении глубины его движения. Однако практика показала, что, если система управления учитывает изменение глубины движения отдельного кондепа и не принимает во внимание изменение глубины движения других кондепов косы, а также ряд параметров динамики косы ГПБА, она может привести как к раскачиванию антенны, так и к интенсивной разрядке аккумуляторов кондепов.

Для обеспечения устойчивости формы косы ГПБА во встроенной системе управления должен формироваться довольно сложный управляющий сигнал. Получение необходимой для этого информации весьма затруднено, трудоемко, а часто и невозможно. Следствием не учета требуемой формы управляющего сигнала является его низкое качество, что, в свою очередь, приводит к неустойчивости формы косы ГПБА.

Встроенные системы управления не учитывают взаимного влияния кондепов, и это является одной из основных причин чрезмерной разрядки их аккумуляторов. Дело в том, что если на гидроакустическую антенну подействовала постоянная внешняя сила даже только на одной точке (т.е. на один кондеп), то при достаточно длительном действии этой силы изменятся глубины хода практически всех кондепов. Примеры расчетов изменения глубины хода кондепов при изменении величины постоянной внешней силы, действующей на один из кондепов косы ГПБА, приведены на рис. 2.

Рассчитывалась форма ГПБА длиной 12 000 м, имеющей в своем составе 41 кондеп, т.е. кондепы

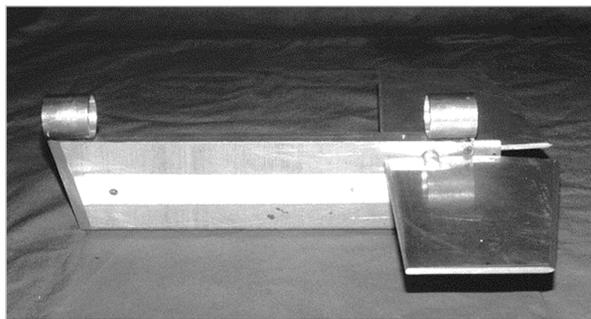


Рис. 1. Модель одного из вариантов построения кондепа

Fig. 1. One of possible condep designs

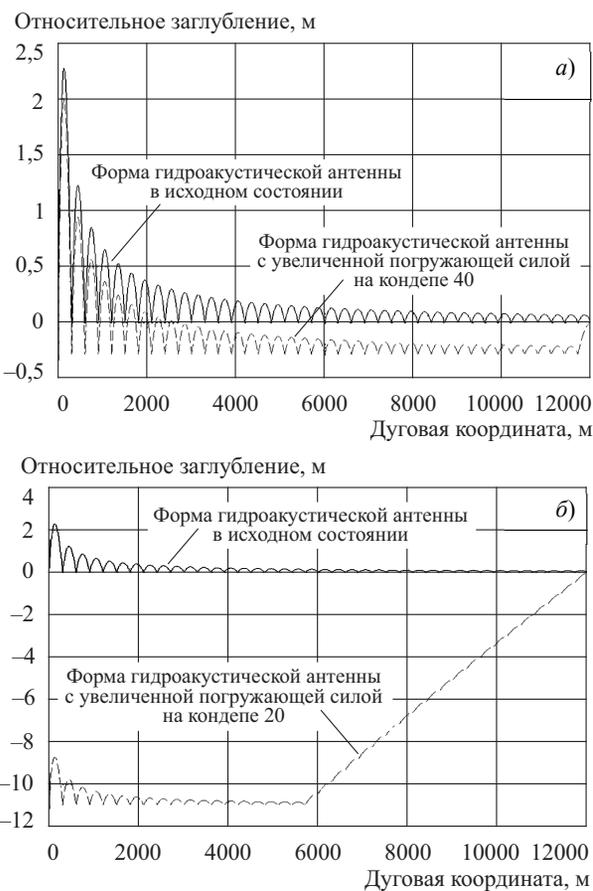


Рис. 2. Сравнение распределений заглубления по длине гидроакустической антенны в исходном состоянии и в случае дополнительного увеличения нагрузки в 1,5 раза: а) на сороковом кондепе; б) на двадцатом кондепе

Fig. 2. Comparison of immersion distribution along the sonar array in the initial state and in case of additional increase of load by 1.5 times: а) for Condep 40; б) for Condep 20

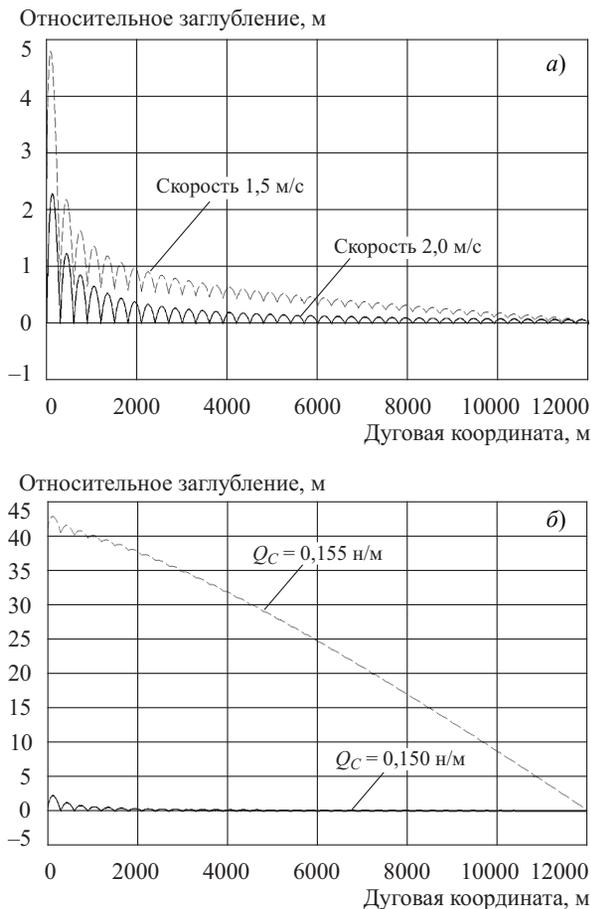


Рис. 3. Сравнение распределений по длине гидроакустической антенны относительного заглубления с одинаковыми величинами управляющих сил на кондепах, но: а) при разных скоростях движения; б) при разных значениях погонного веса антенны

Fig. 3. Comparison of relative immersion distribution along the sonar array with the same controlling forces at condeps at different speeds: а) and at different per-unit-length weights б) of the array

размещались по длине антенны через каждые 300 м. Положительный погонный вес этой антенны в воде равен 0,15 Н/м. Скорость буксировки равнялась 2 м/с.

Сначала ГПБА двигалась в заданном рабочем режиме с постоянной глубиной движения всех кондепов. Затем на один из кондепов подействовала вертикальная сила, в 1,5 раза больше, чем при заданном рабочем режиме.

Рассматриваем установившуюся реакцию антенны на изменение управляющей силы только на одном из кондепов. Нумерация кондепов идет от кормы косы к ее носовой оконечности.

Для того чтобы избежать появления отмеченных выше неблагоприятных ситуаций, при построении системы управления кондепами нужно обеспечить учет взаимного влияния кондепов, а также избежать необходимости реализации во встроенной системе управления сложных управляющих сигналов. При разработке согласованной системы управления кондепами косы ГПБА, прежде всего, следует конструктивно учесть характер действующих внешних сил, которые действуют на гидроакустическую антенну, искажая ее форму по сравнению с заданной и ухудшая качество работы.

С учетом нашей задачи мы можем разделить все внешние возмущающие силы на высокочастотную и низкочастотную группы.

Первая, относительно высокочастотная группа внешних сил обусловлена воздействием на гидроакустическую антенну волнения, качки судна и концевого якоря-стабилизатора, если он входит в состав антенны.

Сразу можно сказать, что борьба с помощью кондепов с возмущениями, действующими на гидроакустическую антенну при частотах порядка частот волнения, даже при «хорошей» встроенной системе управления, практически невозможна. Теоретически в этом случае можно стабилизировать глубину каждого кондепа при непрерывной работе встроенной в кондеп системы стабилизации, что обеспечит компенсацию на всей гидроакустической антенне вертикальных возмущений от качки судна. Однако при этом требуется соблюдение повышенных требований к качеству сигнала управляющей системы, что недостижимо в практике проектирования реальных кос ГПБА.

Бороться с высокочастотными возмущениями нужно, прежде всего, за счет рациональной конструктивной схемы косы, в которой должны быть предусмотрены демпфирующие элементы, обеспечивающие необходимое снижение реакции косы до приемлемого уровня. Однако возникающие на косе высокочастотные силы второго порядка малости могут приводить к медленной эволюции формы косы с выходом заглубления кондепов за коридор допустимых значений. Эту эволюцию формы косы можно отнести к влиянию низкочастотных возмущающих сил.

Вторая, низкочастотная группа возмущающих сил включает в себя как собственно низкочастотные силы, так и быстро возникшие, а затем постоянно действующие силы. К этой группе можно отнести силы, обусловленные изменением плотности воды, скорости буксировки или течением. Сюда же

отнесем нелинейную часть волновых сил при буксировке антенны на небольших глубинах и другие, возможно, малые по величине, но длительно действующие, часто случайные возмущающие силы.

В качестве примера эффекта воздействия низкочастотной силы на косу ГПБА на рис. 3а показано, как меняется форма антенны при изменении скорости буксировки и при отсутствии управления кондепами. Рассчитывалась коса ГПБА, рассмотренная на рис. 2. Скорость буксировки упала с 2 до 1,5 м/с. Результаты сравниваются с исходной формой косы ГПБА. На рис. 3б показано аналогичное сравнение изменения формы косы ГПБА в случае, когда в силу изменения солёности воды положительный погонный вес антенны увеличился всего на 3,3% от своего исходного значения. Расчеты, результаты которых представлены на рис. 3, проводились с условием, что управляющие вертикальные силы не изменялись по сравнению с исходным вариантом.

Таким образом, компенсация возмущений гидроакустической антенны от качки и волнения должна обеспечиваться за счет выбора оптимальной глубины хода косы и надлежащего выбора схемы построения и параметров буксирующей части гидроакустической антенны. Если глубина хода и параметры буксирующей системы выбраны правильно, то вполне можно считать, что на гидроакустическую антенну практически не действуют возмущающие силы с частотами качки судна и волнения.

Простейшая схема буксирующей части предполагает, что буксирующая часть состоит из двух участков: один из них, обычно первый, должен иметь форму, близкую к вертикали, а второй, соединяемый с собственно гидроакустической антенной, форму, близкую к горизонтальной линии. При такой схеме на первом участке интенсивно затухают возмущения от продольной качки судна, на втором – возмущения, обусловленные вертикальной качкой кормы. Пример подобной схемы построения буксирующей части приведен на рис. 4.

Что касается выбора глубины хода косы, то, например, при глубинах хода больше 10 м влиянием волнения интенсивностью 4 балла на форму антенны можно пренебречь.

В соответствии с изложенным управление комплексом кондепов должно быть настроено на компенсацию либо постоянных, либо низкочастотных возмущающих внешних сил.

Проведенные исследования показали, что определить силы на кондепах, потребные для возвращения заданной формы гидроакустической антенне с учетом их взаимного влияния, можно с использо-

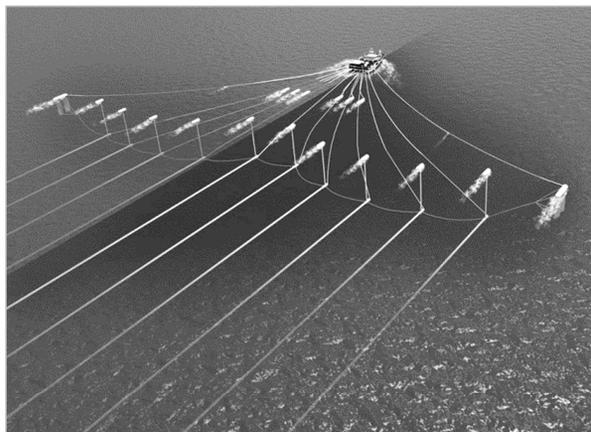


Рис. 4. Пример эффективной системы буксировки гидроакустической антенны

Fig. 4. Example of efficient towing system for sonar array

ванием математических моделей динамики антенны. При этом есть два подхода к построению алгоритмов согласованного управления комплексом кондепов. Один из них основан на использовании стационарной математической модели, а другой – на применении динамической математической модели гидроакустической антенны.

Разумеется, для реализации алгоритмов управления комплексом кондепов на основе математических моделей динамики гидроакустической антенны необходимо, чтобы в бортовом компьютере судна была программа, тем или иным методом реализующая математическую модель поведения гидроакустической антенны при ее буксировке. В программу должны быть введены исходные данные о массогабаритных и гидродинамических характеристиках антенны и кондепов, скорости буксировки, плотности воды, глубинах хода кондепов, углах перекладки крыльев и т.п.

Если используется алгоритм, основанный на использовании стационарной математической модели [1], то замеренные текущие значения глубин хода кондепов вводятся как требуемые. Расчетная программа, как правило, с помощью одного из методов последовательных приближений [9], определяет возмущающие силы, которые привели к отклонению антенны от первоначально заданного положения.

Очевидно, что за счет изменения углов перекладки крыльев на кондепах должны быть созданы силы, равные по модулю определенным программой, но противоположные по знаку.

Если используется алгоритм, основанный на применении нестационарной математической модели [3], то в программу включаются условные блоки, имитирующие работу эффективных автономных систем управления глубиной. Замеренные значения глубин хода кондепов принимаются как заданные условия, а в качестве начальных для системы управления задаются значения глубин, требуемые по условиям эксплуатации антенны.

За счет работы автоматических систем антенна (только на компьютере – реальные автоматы кондепов, конечно, не включаются) переходит в положение, соответствующее замеренным глубинам кондепов, и определенные программой силы от кондепов соответствуют внешним силам, которые вывели антенну из требуемого состояния.

Проведенные исследования показали, что оба алгоритма обеспечивают одинаковую точность определения потребных сил от кондепов. При выполнении расчетов в Крыловском центре оказалось, что быстродействие первого алгоритма [1] намного выше, чем алгоритма, основанного на использовании нестационарной математической модели динамики антенны [3].

Оказалось также, что на результаты определения потребных сил существенно влияет точность вводимых в программы исходных данных о массогабаритных и гидродинамических характеристиках антенны, скорости судна и плотности жидкости и т.п.

Следует отметить, что поведение косы при буксировке описывается известной [1] системой нелинейных уравнений в частных производных. Решение этих уравнений является довольно сложной задачей. Один из путей поиска решений состоит в упрощении уравнений. В рассматриваемом случае возможно упрощение решаемой задачи двумя способами. Первый из них, как указывалось выше, заключается в использовании стационарной системы, описывающей форму косы при установившейся буксировке. Здесь форма антенны описывается системой обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений. Дальнейшее возможное упрощение задачи связано с тем, что современные антенны обладают малой плавучестью. В этом случае большой эффект дает линеаризация уравнений. Кроме того, из-за относительно небольших размеров кондепов по сравнению с длиной участка антенны между кондепами, можно пренебречь инерционными и демпфирующими силами, возникающими на кондепах, и в уравнениях учитывать кондеп как точечную силу, зависящую только от скорости буксировки и угла перекадки крыльев.

С приемлемой точностью вертикальная сила F_{yi}^T , создаваемая кондепом, связана с величиной угла перекадки крыльев δ_i известной формулой

$$\delta_i = \frac{F_{yi}^T}{0,5\rho_w C_y^\delta S V_0^2}, \quad (1)$$

где C_y^δ – коэффициент подъемной силы кондепа; ρ_w – плотность воды; S – площадь крыла кондепа, м².

С учетом сделанных преобразований рациональным способом решения стационарных уравнений формы косы является следующий.

Рассматривается гидроакустическая антенна, имеющая в своем составе K кондепов и, соответственно, $K-1$ секций, обычно равной длины. Кондеп под номером 1 слева прикреплен к кормовому якорю-натяжителю, справа к нему крепится секция антенны под номером 1. Кондеп под номером K слева крепится к секции антенны под номером $K-1$, а справа к нему крепится буксирующая часть системы. К внутреннему кондепу с номером $k=2, \dots, K-1$ слева крепится секция антенны с номером $k-1$, справа секция под номером k .

Каждая секция антенны разбивается равномерно слева направо на N расчетных точек. Таким образом, внутренние кондепы с номерами $k=2, \dots, K-1$ совпадают слева с расчетной точкой N секции $k-1$, а справа с расчетной точкой с номером 1 секции антенны под номером k .

Тогда, на первом шаге расчета по рассматриваемому частному алгоритму, необходимо рассчитать распределение эффективного натяжения $T_0(s_0)$ по всей длине гидроакустической антенны как функции недеформированной дуговой координаты s_0 . Для расчета эффективного натяжения используется следующее дифференциальное уравнение:

$$T_0'(s_0) = \sqrt{c_\alpha(s_0)} k_\tau V_0^2, \quad (2)$$

где $c_\alpha(s_0) = 1 + \alpha T_0(s_0)$; α – коэффициент податливости деформированной косы на продольное сжатие-растяжение; k_τ – погонный коэффициент касательной гидродинамической силы на косе; V_0 – скорость буксировки косы.

В пограничных расчетных точках между секциями антенны эффективное натяжение $T_0(s_0)$ будет непрерывной функцией. Таким образом, определим натяжение антенны в точках крепления кондепов T_{0k} , $k=1, \dots, K$.

Затем, последовательно переходя от секции к секции антенны, необходимо найти распределение угла наклона антенны $\varphi(s_0)$.

Для каждой секции антенны решается система уравнений

$$\left. \begin{aligned} \varphi'(s_0) &= -T_0^{-1}(s_0)G_C \\ y'(s_0) &= -c_\alpha(s_0)\varphi(s_0) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где G_C – погонный вес косы ГПБА.

Распределение вертикальной координаты гидроакустической антенны $y(s_0)$ по границам каждой ее секции должно совпадать с известными вертикальными координатами кондепов, полученными с использованием датчиков давления.

Таким образом, общая задача распадается на последовательное решение для каждой секции антенны краевых задач по определению угла наклона, обеспечивающего требуемое заглубление правого кондепа секции при известном заглублении левого кондепа данной секции.

На каждой секции под номером $k = 1, \dots, K - 1$ считаем заданными граничные вертикальные координаты y_k и y_{k+1} , которые соответствуют заглублениям кондепов, связанных с данной секцией. Определяется такой угол наклона φ_k на ее левой оконечности, чтобы вертикальная координата y_{k+1} на ее правой оконечности соответствовала заданному заглублению соответствующего кондепа. Иными словами, решается краевая задача Коши для угла наклона антенны с определением требуемого краевого значения этого угла наклона [9]. В данном случае такую нелинейную краевую задачу удобнее всего решать методом бисекции. В итоге для каждого кондепа с номером $k = 1, \dots, K$ получаем два угла наклона – φ_k^+ и φ_k^- – для правой и, соответственно, левой секции антенны, связанных с данным кондепом.

Интегрирование по длине гидроакустической антенны рекомендуется проводить методом прогноза и коррекции четвертого порядка точности. Необходимое при этом стартовое интегрирование для первых четырех расчетных точек следует выполнять методом Рунге – Кутты, также четвертого порядка точности.

После того как определены распределения натяжения и угла наклона по всей длине антенны, нужно определить силу заглубления $F_{y_k}^C$, $k = 1, \dots, K$ на кондепах, необходимую для удержания антенны на заданной глубине. Предполагая, что вертикальная управляющая гидродинамическая сила на кондепе $F_{y_k}^C$ будет положительной, если она направлена вниз, определим ее в следующем виде:

$$F_{y_1}^C = T_{01}\varphi_1^+,$$

$$F_{y_k}^C = T_{0k}(\varphi_k^+ - \varphi_k^-), \quad k = 2, \dots, K - 1,$$

$$F_{y_K}^C = -T_{0K}\varphi_K^-.$$

Следует отметить, что предложенный алгоритм согласованного управления комплексом кондепов эффективен не только для корректировки формы антенны в процессе буксировки, но и для первоначальной вывески антенны в начале ее использования. Следует также отметить, что этот алгоритм не предполагает использования встроенных в кондеп автономных систем управления. Однако он требует измерения глубины хода каждого кондепа и значительных углов перекладки крыльев, передачи этой информации на бортовой компьютер и обеспечения возможности перекладки крыльев по команде с борта судна.

Библиографический список

References

1. *Зеленский Б.М.* Исследование динамики протяженных связей морских систем. Ч. 1, 2. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2014. [B. Zelensky. Dynamic studies of long lines for marine systems. Parts 1–2. St. Petersburg: KSRC, 2014. (in Russian)].
2. *Зайцев В.Н., Зеленский Б.М.* Метод расчета динамики ПС морских систем на основе теории сингулярных возмущений // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2000. Вып. 10(294). С. 74–96. [V. Zaitsev, B. Zelensky. Dynamic calculation method for long lines of marine system based on singular excitation theory // KSRC Transactions. 2000; 10(294): 74–96. (in Russian)].
3. *Егорова Т.Б., Зайцев В.Н.* Алгоритм приближенного метода решения уравнений динамики морских трубопроводов // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2000. Вып. 10(294). С. 97–102. [T. Yegorova, V. Zaitsev. Approximate solution algorithm for dynamic equations of subsea pipelines // KSRI Transactions. 2000; 10(294): 97–102. (in Russian)].
4. *Зеленский Б.М.* Использование теории обобщенных функций в методе расчета динамики протяженных связей морских систем // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2004. Вып. 17(301). С. 164–183. [B. Zelensky. Application of generalized functions theory in dynamic calculation method for long lines of marine systems // KSRC Transactions. 2004; 17(301): 164–83. (in Russian)].
5. *Зеленский Б.М.* Использование аппарата теории сингулярных возмущений при решении задач динамики протяженных связей морских систем // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2012. Вып. 69(353). С. 117–

130. [B. Zelensky. Application of singular excitations theory in dynamic problems for long lines of marine systems. KSRC Transactions. 2012; 69(353): 117–30. (in Russian)].
6. *Зеленский Б.М.* Обоснование и уточнение метода сосредоточенных параметров для расчета динамики протяженных элементов сложных морских систем на основе обобщенных функций // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2012. Вып. 69(353). С. 163–173. [B. Zelensky. Justifying and précising the method of concentrated parameters to calculate the dynamics of long lines in complicated marine systems basing on generalized functions. KSRC Transactions. 2012; 69(353): 163–73. (in Russian)].
7. *Зеленский Б.М.* Математическая модель динамики протяженных связей морских систем на основе теории обобщенных функций // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2004. Вып. 17(301). С. 184–199. [B. Zelensky. Mathematical model for dynamics of long lines in marine systems based on generalized functions theory // KSRC Transactions. 2004; 17(301): 184–99. (in Russian)].
8. *Васильев Ю.П., Зайцев В.Н., Зеленский Б.М., Негашев С.В.* Управление глубиной погружения сейсморазведочной антенны при ее буксировке в условиях морского волнения // Труды 27-й конференции СУДС, ИАТ. М., 2000. С. 52–59. [Yu. Vasilyev, V. Zaitsev, B. Zelensky, S. Negashev. Diving depth control of seismic exploration array towed in sea waves // Transactions of 27th SUDS conference, IAT. Moscow, 2000: 52–9. (in Russian)].
9. *Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.В.* Вычислительные методы для инженеров. М.: Высшая школа, 1994. [A. Amosov, Yu. Dubinsky, N. Kopchenova. Calculation methods for engineers. Moscow, Vyshaya Shkola, 1994. (in Russian)].

Сведения об авторах

Григоров Максим Юрьевич, инженер 1 категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Телефон: 8 (812) 415-33-84. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Егорова Татьяна Борисовна, ведущий инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Телефон: 8 (812) 415-36-36. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Зайцев Владимир Николаевич, главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Телефон: 8 (812) 415-32-98. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Зеленский Борис Михайлович, ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Телефон: 8 (812) 415-36-07. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Тюшкевич Владислав Вильгельмович, к.т.н., ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Телефон: 8 (812) 415-39-01. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

About the authors

Grigоров, Maksim Yu., Engineer 1st category, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-33-84. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Egorova, Tatyana B., Leading Engineer, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-36-36. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Zaitsev, Vladimir N., Principal Research Scientist, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-32-98. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Zelensky, Boris M., Leading Research Scientist, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-36-07. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Tyushkevich, Vladislav V., Cand. Sc. (Tech), Leading Research Scientist, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-39-01. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 13.02.18
Принята в печать / Accepted: 05.03.18
© Коллектив авторов, 2018