

УДК 629.584:681.51
Ч-18

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ГЛУБИНЫ БУКСИРУЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ДЛЯ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ

Чан Там Дык, инж.

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Разработана структура системы автоматического управления глубиной буксируемого подводного аппарата для установившегося режима его работы. Синтезирован закон управления глубиной его хода в виде полинома 4-й степени для установившегося режима движения. Разработан алгоритм устранения статической ошибки управления.

Ключевые слова: буксируемый подводный аппарат, глубина, система управления, синтез закона управления.

Анотація. Розроблено структуру системи автоматичного керування глибиною буксированого підводного апарата для установившого режиму його роботи. Синтезовано закон керування глибиною його ходу у вигляді полінома 4-го ступеня для установившого режиму руху. Розроблено алгоритм усунення статичної похибки керування.

Ключові слова: буксирований підводний апарат, глибина, система керування, синтез закону керування.

Abstract. The structure of the automatic control system has been developed for the depth of the towed underwater vehicle for its steady operation mode. The law for depth control has been synthesized in the form of the four-degree polynomial for the steady operation mode. The algorithm of the static error elimination has been developed.

Keywords: towed underwater vehicle, depth, control system, control law synthesis.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Буксируемые подводные аппараты (БПА) широко применяются при выполнении поисковых, инспекционных и исследовательских подводных работ [4, 5]. Наиболее часто БПА используются в составе однозвенной буксируемой системы, оборудованной заглубляющим БПА, кабель-буксиром (КБ) и расположенными на судне-буксировщике (СБ) лебедкой КБ (Л) и постом энергетики и управления (ПЭУ) — рис. 1.

Заглубляющую силу БПА обеспечивают несущие поверхности (НП), а управление по глубине осуществляется с помощью руля глубины (РГ).

К системам автоматического управления (САУ) БПА сегодня предъявляются повышенные требования в отношении точности удержания на заданной траектории движения, в частности к глубине хода в установившемся режиме [6, 7].

Опыт украинских организаций в проектировании и морской эксплуатации БПА показывает, что наиболее высокие требования к точности управления глубиной хода БПА предъявляются при выполнении подводных геологических, поисково-спасательных и археологических работ [1]. При этом ставится задача поддержания с высокой точностью ($\pm 0,1$ м) заданной глубины хода БПА, при котором обеспечивается проектное функционирование бортовой поисковой и научно-исследовательской аппаратуры.

Успешное решение такой задачи возможно путем создания специальных регуляторов глубины БПА, построенных на основе использования принципов искусственного интеллекта и способных функционировать в условиях неполной информации о собственных характеристиках.

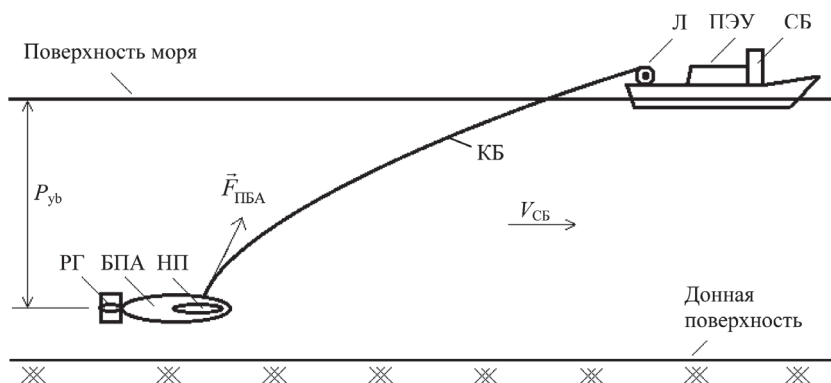


Рис. 1. Состав однозвенной подводной буксируемой системы

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Изучение вопросов автоматизации управления БПА различных назначения и конструкции показывает, что существующие регуляторы глубины строятся на принципах классической теории автоматического управления и успешно решают задачи стабилизации хода подводного аппарата по глубине для определенных режимов эксплуатации [6]. При этом учитываются такие существенные воздействия на БПА, как силы сопротивления кабель-буксира при его продольном перемещении в воде, волнение моря и качка судна-буксировщика [3].

Однако для ряда эксплуатационных случаев, когда собственные гидродинамические характеристики БПА нестационарны или неизвестны, методики синтеза регуляторов глубины хода БПА отсутствуют.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — синтез регулятора глубины буксируемого подводного аппарата повышенной точности для установившегося режима движения на основе использования элементов искусственного интеллекта.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

К основным эксплуатационным параметрам БПА в установившемся режиме движения относятся скорость буксировки V_{CB} , длина КБ L_{KB} и глубина хода как управляемая величина — вертикальная координата БПА P_{yb} , измеряемая от поверхности воды. Установившееся (квазистационарное) движение судна-буксировщика и БПА начинается после завершения переходного процесса, когда вектор силы натяжения КБ \vec{F}_{KB} уравнивается векторами сил несущей поверхности \vec{F}_{HP} , руля глубины \vec{F}_{PG} и сопротивления корпуса БПА потоку воды \vec{F}_{PI} , т. е. когда равнодействующая всех сил, которые действуют на корпус БПА, равна нулю:

$$\vec{F}_{БПА} = \vec{F}_{PI} + \vec{F}_{HP} + \vec{F}_{PG} + \vec{F}_{KB} = 0.$$

Наличие гибкой связи оказывает решающее влияние на управление в установившемся режиме движения БПА, поскольку положение ходового конца КБ (и самого БПА) относительно СБ зависит от действующих на него сил. Таким образом, каждому вектору \vec{F}_{KB} соответствует определенное положение БПА относительно СБ $\vec{P}_{БПА}$ при $V_{CB} = \text{const}$ и $L_{KB} = \text{const}$ [7]:

$$\vec{P}_{БПА} = \vec{f}(-\vec{F}_{KB}) = \vec{f}(\vec{F}_s); \quad (1)$$

$$\vec{F}_s = \vec{F}_{PI} + \vec{F}_{HP} + \vec{F}_{PG}, \quad (2)$$

где \vec{F}_s — вектор управляющей силы.

Выражение (1) для расширенных условий эксплуатации принимает вид

$$\vec{P}_{БПА} = \vec{f}(\vec{F}_s, V_{CB}, L_{KB}) = 0. \quad (3)$$

Вектор \vec{F}_s можно представить зависимостью

$$\vec{F}_s = \vec{f}(\alpha_{PG}, V_{CB}), \quad (4)$$

поскольку каждая составляющая в (2) при установившемся движении зависит только от угла α_{PG} и скорости буксировки V_{CB} .

Объединение (3) и (4) дает зависимость положения БПА относительно СБ в установившемся режиме с учетом эксплуатационных параметров БПА

$$\vec{P}_{БПА} = \vec{f}(\alpha_{PG}, V_{CB}, L_{KB}). \quad (5)$$

Буксируемые подводные аппараты, как правило, проектируются для некоторой рабочей глубины Y_p с возможностью перемещаться относительно нее в некоторых заданных пределах. Эксплуатационный параметр L_{KB} при этом определяется формулой $L_{KB} = (2,0 \dots 2,5)Y_p$ [4] и в процессе эксплуатации его не меняют, т. е. $L_{KB} = \text{const}$. Кроме того, постановка задачи предполагает управление только глубиной погружения БПА (вертикальной координатой P_{yb}). Исходя из этого выражение (5) упрощается и принимает скалярный вид

$$P_{yb} = f(\alpha_{PG}, V_{CB}). \quad (6)$$

Зависимость (6) по сути представляет собой модель вертикального установившегося движения БПА; решив (6) относительно управляющего воздействия, получим инверсную модель (ИМ) вертикального движения БПА, которая будет представлять собой закон управления глубиной БПА:

$$\alpha_{PG} = f(Y_3, V_{CB}), \quad (7)$$

где Y_3 — заданное значение положения БПА по вертикали.

Структура САУ принимает вид, изображенный на рис. 2. Регулятор САУ представляет собой реализацию ИМ вертикального движения БПА.

Синтез закона управления (7) осуществим на базе компьютерного эксперимента с использованием моделирующего комплекса [9]. Выполним моделирование движения БПА при $V_{CB} = 1,0$ м/с и длине КБ $L_{KB} = 100$ м для всех экспериментов. Установим управляющее воздействие $\alpha_{PG} = -12^\circ$ и зафиксируем окончание переходного процесса по признаку $|V_{yb}| < 0,001$ м/с. По завершении переходного процесса БПА оказался на глубине $P_{yb} = -5,4$ м. Длительность переходного процесса составила ≈ 530 с. Далее увеличиваем угол α_{PG} на 1° и фиксируем окончание переходного процесса (рис. 3).

Как видим, при достижении некоторой максимальной глубины, обозначенной на графике точкой А, по мере увеличения α_{PG} БПА снова начнет перемещаться вверх. Установившиеся состояния БПА в зависимости от управляющего воздействия α_{PG} сведены в табл. 1.

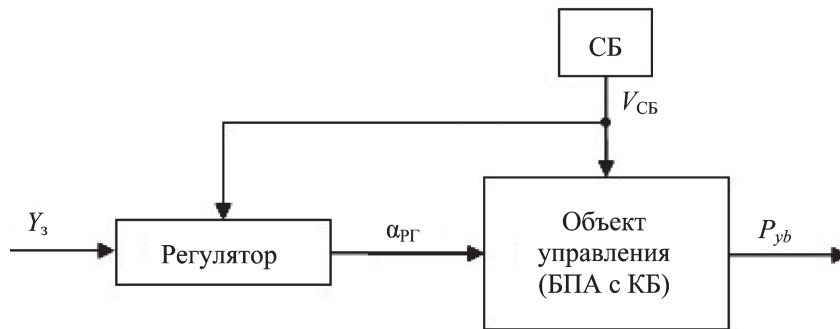


Рис. 2. Структура САУ БПА в установившемся режиме движения

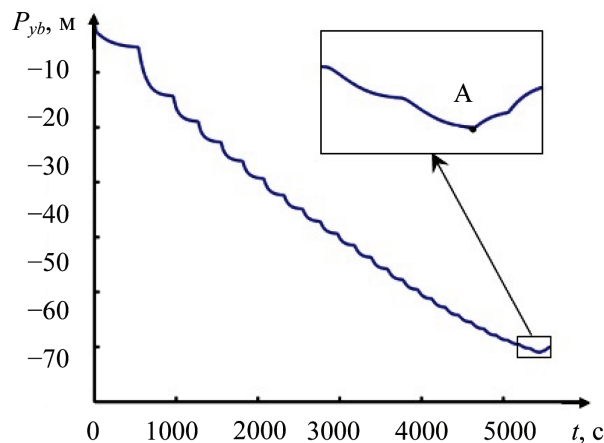


Рис. 3. Изменение глубины БПА при ступенчатом изменении $\alpha_{\text{НП}}$

Таблица 1. Состояния БПА в установившемся движении при $V_{\text{СБ}} = 1 \text{ м/с}$

$\alpha_{\text{рг}}$, град	t , с	P_{yb}	ψ , град	$\alpha_{\text{рг}}$, град	t , с	P_{yb}	ψ , град	$\alpha_{\text{рг}}$, град	t , с	P_{yb}	ψ , град
-12	530	-5,4	9,8	-3	2964	-39,3	2,6	6	4599	-55,5	-5,3
-11	958	-14,3	9,1	-2	3172	-41,5	1,8	7	4752	-56,7	-6,1
-10	1264	-18,9	8,3	-1	3376	-43,7	0,9	8	4902	-57,9	-6,8
-9	1541	-22,7	7,5	0	3574	-45,8	-0,1	9	5042	-58,7	-7,6
-8	1807	-26,1	6,8	1	3763	-47,7	-1,0	10	5180	-59,5	-8,4
-7	2064	-29,3	6,0	2	3942	-49,5	-1,9	11	5315	-60,3	-9,1
-6	2312	-32,3	5,2	3	4115	-51,2	-2,7	12	5449	-61,0	-9,9
-5	2538	-34,9	4,3	4	4281	-52,7	-3,6	13	5510	-60,6	-10,1
-4	2755	-37,1	3,5	5	4442	-54,2	-4,4	14	5571	-60,0	-10,4

Столбцы $\alpha_{\text{рг}}$ и P_{yb} табл. 1 представляют собой табличную модель вертикального установившегося движения БПА при $V_{\text{СБ}} = 1 \text{ м/с}$. На ее основе можно моделировать как прямую (6), так и инверсную (7) зависимости, используя методы интерполяции для значений, которые не вошли в таблицу, предварительно исключив из таблицы строки, для которых $\psi < -10^\circ$.

На рис. 4, а представлена зависимость $P_{\text{yb}} = f(\alpha_{\text{рг}})$ для $V_{\text{СБ}} = 10 \text{ м/с}$, а также зависимость дифферента ψ от $\alpha_{\text{рг}}$; точка А соответствует максимальной глубине БПА, в точке А₁ дифферент $\psi \approx -10^\circ$ и угол атаки НП $\gamma_{\text{НП}} \approx -15^\circ$.

Выполним моделирование движения БПА при $V_{\text{СБ}} = 1,5; 2,0; 2,5$ и $3,0 \text{ м/с}$. Для каждого значения

скорости будем фиксировать установившиеся глубины, изменяя значение $\alpha_{\text{рг}}$ от -10° до 10° с шагом 1° . Результаты моделирования приведены на рис. 4, б–г. На рис. 4, в показаны проекции графиков рис. 4, б на горизонтальную плоскость. Совокупность точек (графики рис. 4, б) образует табличную модель, позволяющую моделировать прямую (6) и инверсную (7) зависимости для диапазона скоростей от $1,0$ до $3,0 \text{ м/с}$. Изменение $\alpha_{\text{рг}}$ в диапазоне от -10° до 10° обеспечивает глубины порядка $-20 \dots -60 \text{ м}$, что соответствует рабочей зоне БПА.

На основе табличной модели, используя генератор формул Eqno [8], основанный на средствах искусственного интеллекта, получим закон управления (7) в аналитическом виде

$$\alpha_{\text{РГ}} = a_0 + a_1 Y_3 + a_2 V_{\text{СБ}} + a_3 Y_3^2 + a_4 V_{\text{СБ}}^2 + a_5 Y_3 V_{\text{СБ}} + a_6 Y_3^3 + a_7 V_{\text{СБ}}^3 + a_8 Y_3 V_{\text{СБ}}^2 + a_9 Y_3^2 V_{\text{СБ}} + a_{10} Y_3^4 + a_{11} Y_3^2 V_{\text{СБ}}^2 + a_{12} V_{\text{СБ}}^4, \quad (7)$$

где $a_{1...12}$ — коэффициенты, определенные программой Еquo (табл. 2).

Работу регулятора, реализующего закон управления (8), организуем по алгоритму, представленному на рис. 5.

После считывания заданного значения глубины Y_3 и скорости буксирования $V_{\text{СБ}}$ выполняются расчет

управляющего воздействия $\alpha_{\text{РГ}}$ по закону (8) и его вывод на исполнительный механизм РГ. Далее цикл управления повторяется либо регулятор завершает работу.

Компьютерный эксперимент показал, что использование закона управления (8) обеспечивает позиционирование БПА по глубине в диапазоне $P_{\text{уб}} \in [-20, -60]$ при скоростях буксирования $V_{\text{СБ}} \in [1...3]$ со статической ошибкой $e_{\text{ст}} < 0,7$ м. Полученная точность вполне достаточна для задач, выполняемых в установившемся режиме движения БПА.

При реальном движении БПА с СБ возможно увеличение ошибки $e_{\text{ст}}$, вызванное неточностями при

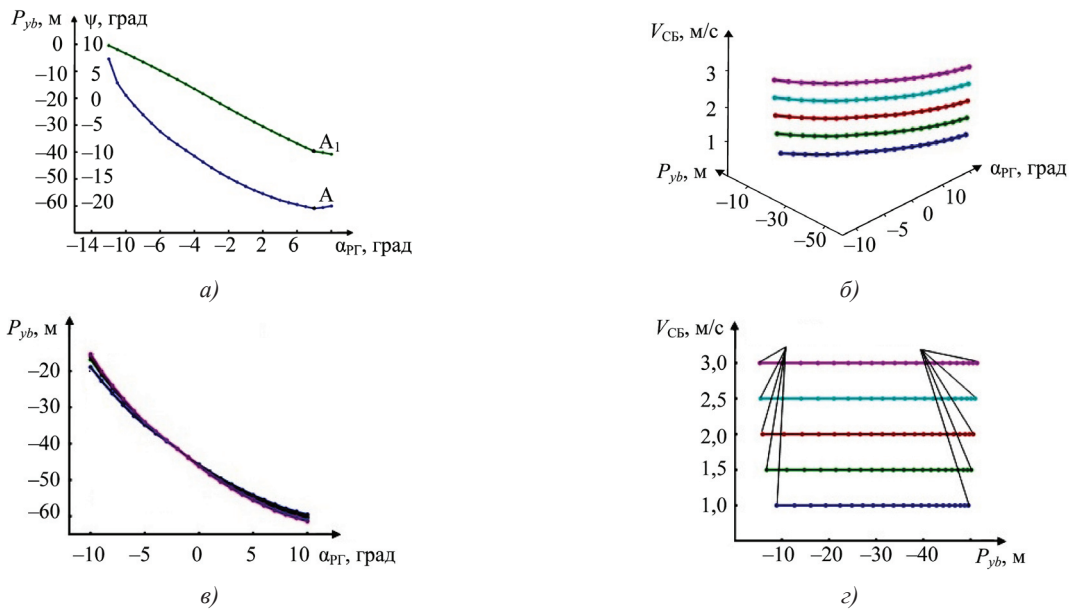


Рис. 4. Состояния БПА в установившемся режиме движения и зависимость глубины от управляющего воздействия и скорости буксировки

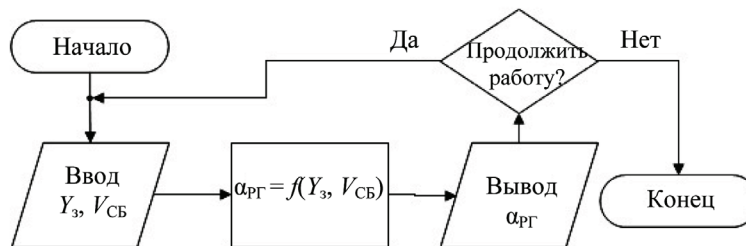


Рис. 5. Блок-схема алгоритма работы регулятора САУ

Таблица 2. Коэффициенты полинома

i	a_i	i	a_i	i	a_i
0	-4,78985127913863	5	-0,053462288664402	9	-0,001510127419061
1	1,07838112089853	6	0,00101233832384	10	7,353380755e-06
2	0,524498757673096	7	-0,031217092155962	11	0,000163497882865
3	0,056809451901088	8	0,003062151365192	12	0,002806038681672
4	-0,113131482417935				

измерении скорости буксирования V_{CB} и неравномерной скоростью обтекания КБ. Для устранения ошибки $e_{ст}$ предлагается корректировать заданное значение Y_3 , прибавляя к нему величину ошибки $e_{ст}$. Такой подход в достаточной степени эффективен для устранения $e_{ст}$, поскольку нелинейность зависимостей глубины от $\alpha_{рГ}$ при $V_{CB} = \text{const}$ слабо проявляется в пределах нескольких метров (см. рис. 4). Блок-схема алгоритма регулятора глубины БПА для установившегося режима движения с коррекцией задающего воздействия показана на рис. 6.

В блоке 1 выполняется считывание заданных значений глубины Y_3 и скорости буксирования V_{CB} .

В блоке 2 задаются начальные значения статической ошибки $e_{ст} = 0$ и откорректированного задающего воздействия $Y_k = Y_3$. При этом статическая ошибка считается равной нулю и, соответственно, откорректированная заданная величина Y_k принимается равной исходной заданной величине Y_3 .

Блок 3 выполняет коррекцию заданной величины, суммируя ее предыдущее значение и статическую ошибку.

В блоке 4 выполняется расчет управляющего воздействия $\alpha_{рГ}$ по закону (8), которое затем выводится в блоке 5 на исполнительный механизм РГ. При этом в закон управления в качестве аргумента передается откорректированное значение задающего воздействия.

Блок 6 выполняет процедуру ожидания заданной длительности t_w . При ступенчатом изменении управляющего воздействия скорость вертикального перемещения БПА V_{yb} изменяется не мгновенно, т. е. V_{yb} еще приблизительно равна нулю, но БПА уже выведен из установившегося режима буксирования и обладает некоторым ускорением. За время t_w БПА разгоняется до определенной скорости и таким образом предотвращается ложное срабатывание условия в блоке 8. Как правило, значения $t_w = 10 \dots 20$ с вполне достаточно.

В блоке 7 выполняется считывание текущего значения вертикальной скорости БПА V_{yb} и его текущей глубины P_{yb} .

В блоке 8 проверяется условие $|V_{yb}| < V_{ст}$, где $V_{ст}$ — порог скорости, по которому регулятор определяет,

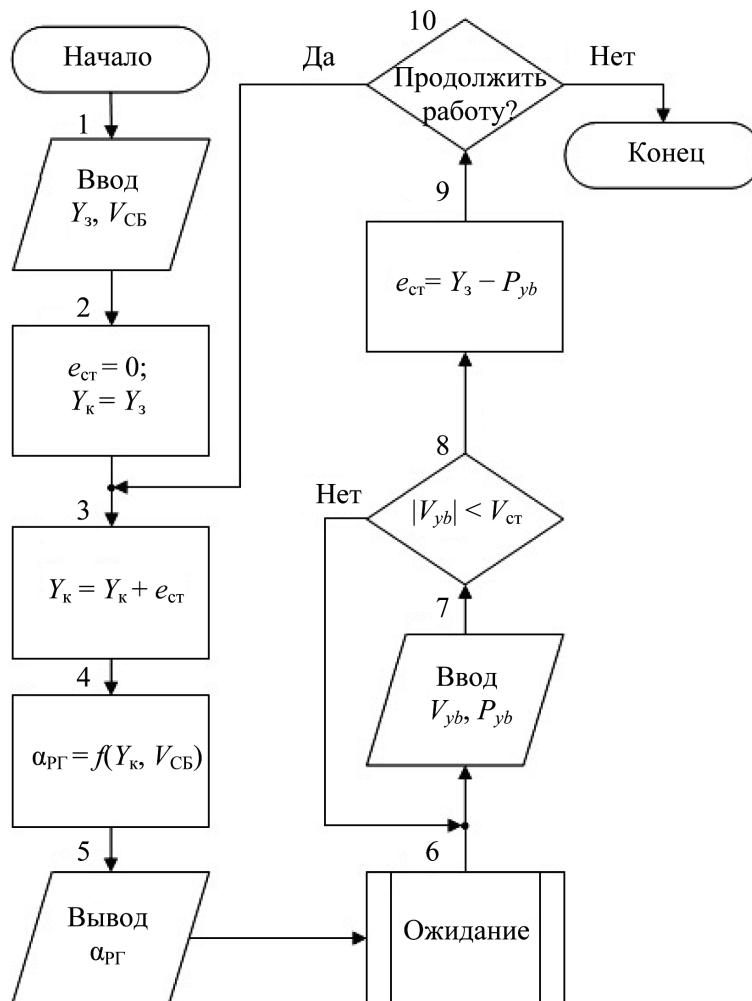


Рис. 6. Блок-схема алгоритма работы регулятора САУ с коррекцией задающего воздействия

завершился ли переходный процесс. В математической модели САУ БПА величина $V_{ст}$ принята равной 0,001 м/с. В реальном объекте управления выбор величины $V_{ст}$ зависит от чувствительности датчика скорости погружения/всплытия.

В блоке 9 рассчитывается текущее значение ошибки $e_{ст}$; если после блока 10 работа продолжается, алгоритм переходит к блоку 3.

Для обеспечения работы такого регулятора в структуру САУ вводится обратная связь по управляемой величине P_{yb} , а также по скорости вертикального перемещения БПА V_{yb} (рис. 7, а).

Результаты компьютерного моделирования показали, что статическая ошибка сводится к значениям $e_{ст} < 0,01$ м, т.е. практически к нулю, за две-три итерации цикла управления.

На рис. 7, б представлены результаты моделирования для самого неблагоприятного случая, когда разница между фактической и измеренной скоростями хода БПА составляет 2 м/с и задающее воздействие $Y_3 = -20$ м.

Первая итерация цикла управления длилась около 135 с, и после завершения переходного процесса статическая ошибка составила $e_{ст} = -3,13$ м. Вторая итерация длилась около 95 с, и ошибка составила $e_{ст} = 0,31$ с. По прошествии 50 с третьей итерации ошибка управления $e_{ст} < 0,01$ м. Общая длительность переходных процессов составила 280 с.

Серия компьютерных экспериментов при различных исходных данных показала, что суммарная длительность переходных процессов составляет порядка 5...10 мин и не превышает 20 мин. Полученные результаты работы САУ удовлетворяют условиям установившегося режима буксирования и позволяют в автоматическом режиме управлять глубиной БПА.

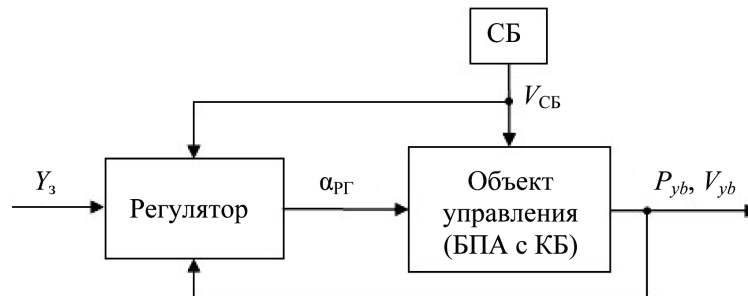
ВЫВОДЫ

1. На основе анализа математической модели движения буксируемого подводного аппарата разработана структура системы автоматического управления его глубиной для установившегося режима работы.

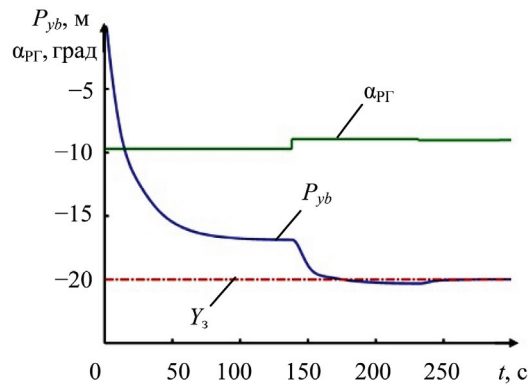
2. Полученная табличная модель установившегося движения БПА является основой для синтеза, с помощью генератора формул Equo, закона управления глубиной хода БПА в виде полинома 4-й степени для установившегося режима движения.

3. Регулятор глубины БПА, синтезированный на основе разработанного алгоритма устранения статической ошибки управления путем коррекции задающего воздействия, обеспечивает заданную глубину погружения в установившемся режиме движения.

4. Работоспособность регулятора подтверждена компьютерным экспериментом, общая длительность переходных процессов циклов управления не превышает 20 мин, что удовлетворяет установившемуся режиму движения буксируемого подводного аппарата.



а)



б)

Рис. 7. Структура (а) и результаты работы (б) САУ БПА в установившемся режиме движения

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Блінцов, В. С.** Базові технології застосування підводних апаратів-роботів для задач морської археології [Текст] / В. С. Блінцов, С. О. Воронов // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матер. міжнар. наук.-техн. конференції. — Миколаїв : НУК, 2010. — С. 389–391.
- [2] **Блінцов, О. В.** Синтез замкненої системи автоматичного керування просторовим рухом самохідного прив'язного підводного апарата в квазістаціонарному режимі роботи [Текст] / О. В. Блінцов // Механіка гіроскопічних систем : наук.-техн. збірник. — К. : НТУУ «КПІ», 2008. — Вип. 19. — С. 29–37.
- [3] **Бугаєнко, Б. А.** Динамика судовых спускоподъемных операций [Текст] / Б. А. Бугаєнко. — К. : Наукова думка, 2004. — 320 с.
- [4] Динамика подводных буксируемых систем [Текст] / В. И. Поддубный, Ю. Е. Шамарин, Д. А. Черненко, Л. С. Астахов. — СПб. : Судостроение, 1995. — 200 с.
- [5] **Иконников, И. Б.** Подводные буксируемые системы и буи нейтральной плавучести [Текст] / И. Б. Иконников, В. М. Гаврилов, Г. В. Пузырев. — СПб. : Судостроение, 1993. — 224 с.
- [6] **Кувшинов, Г. Е.** Системы управления глубиной погружения буксируемых объектов [Текст] : монографія / Г. Е. Кувшинов, Л. А. Наумов, К. В. Чупина. — Владивосток : Дальнаука, 2005. — 285 с.
- [7] Привязные подводные системы. Прикладные задачи статики и динамики [Текст] / Н. И. Виноградов, М. Л. Гутман, И. Г. Лев, М. З. Нисневич. — СПб. : Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2000. — 324 с.
- [8] Програмний продукт «Генератор формул Equo» [Текст] // ПП «Інтелектуалізовані технології автоматизації і методи моделювання» : свідоцтво на знак для товарів і послуг № 65047 від 15.08.2006 р. Державного департаменту інтелектуальної власності МОН України. — К., 2006.
- [9] Специализированный моделирующий комплекс для исследования эффективности системы управления подводной буксируемой системой [Текст] / О. В. Блінцов, Ж. Ю. Буруніна, П. Г. Клименко, Чан Там Дык // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2012. — № 1 (442). — С. 92–97.

© Чан Там Дик

Надійшла до редколегії 20.02.2013

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК
д-р техн. наук, проф. *В. С. Блінцов*

Статтю розміщено у Віснику НУК № 2, 2012