

## Разработка и исследование позиционно-траекторного регулятора для управления движением подводного глайдера

*Б.В. Гуренко, А.М. Маевский, К.А. Суров, А.С. Назаркин  
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** В данной работе рассматривается процедура разработки системы управления глайдером для движения в трехмерной среде на основе позиционно-траекторных законов управления, разработанных проф. Пшихоповым В.Х. Для обеспечения управления используется модель пространственного движения глайдера, учитывающая составляющую переменной плавучести. В результатах работы представлены графики, демонстрирующие работоспособность разработанной системы.

**Ключевые слова:** глайдер, система управления, позиционно-траекторный регулятор, управление движением, математическое моделирование.

### Введение

В данной работе рассматривается процедура синтеза регулятора автономного подводного робота типа глайдер, основанный на работе позиционно-траекторного регулятора [1, 2]. Данный регулятор находит широкое применение в автономном управлении подвижными объектами различного типа [3].

Основными преимуществами данного регулятора являются управление нелинейными объектами, в котором учитываются внешние возмущения среды, а так же учет многосвязности и нелинейности математической модели объекта управления.

### Построение математической модели

В приведенных работах представлена структура построения математической модели, учитывающей движение глайдера. Для вывода математической модели глайдера использованы следующие прямоугольные системы координат, показанные на рис. 1.

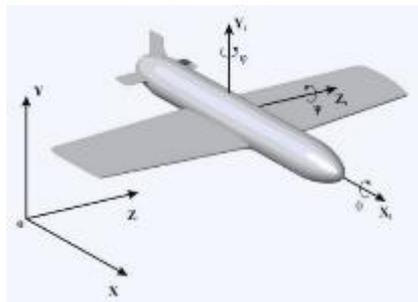


Рис. 1 – Системы координат и положительные направления углов ориентации глайдера

Общий вид математической модели движения глайдера в трехмерной среде выглядит следующим образом (1.1–1.6):

$$(p_w V + \lambda_{11}) \dot{v}_{x1} = c_{x1} \frac{p_w v_0^2}{2} V^{2/3} + (p_w V + \lambda_{22}) v_{y1} \omega_{z1} + \lambda_{26} \omega_{z1}^2 + p \sin \psi; \quad (1.1)$$

$$(p_w V + \lambda_{22}) \dot{v}_{y1} + \lambda_{26} \dot{\omega}_{z1} = c_{y1} \frac{p_w v_0^2}{2} V^{2/3} + c_{y1}^{\omega_{z1}} \frac{p_w v_0}{2} \omega_{z1} V - (p_w V + \lambda_{11}) v_{x1} \omega_{z1} + p \cos \psi; \quad (1.2)$$

$$(J_{z1} + \lambda_{66}) \dot{\omega}_{z1} + \lambda_{26} \dot{v}_{y1} = m_{z1} \frac{p_w v_0^2}{2} V + m_{z1}^{\omega_{z1}} \frac{p_w v_0}{2} \omega_{z1} V^{4/3} - p_w V g h \sin \psi - \lambda_{26} v_{x1} \omega_{z1} + p(x_p \cos \psi - y_p \sin \psi); \quad (1.3)$$

$$(p_w V + \lambda_{33}) \dot{v}_{z1} + \lambda_{35} \dot{\omega}_{y1} = c_{z1}^{\beta} \frac{p_w v_0}{2} V^{2/3} v_{z1} + c_{z1}^{\omega_{z1}} \frac{p_w v_0}{2} \omega_{z1} V - \omega_{x1} (p_w V + \lambda_{22}) v_{y1} + \omega_{y1} (p_w V + \lambda_{11}) v_{x1} - p \cos \psi \sin \theta; \quad (1.4)$$

$$(J_{x1} + \lambda_{44}) \dot{\omega}_{x1} + \omega_{y1} \lambda_{26} v_{y1} + v_{y1} \lambda_{35} \omega_{y1} = m_{x1}^{\beta} \frac{p_w v_0}{2} V v_{z1} + m_{x1}^{\omega_{x1}} \frac{p_w v_0}{2} V^{4/3} \omega_{x1} + m_{x1}^{\omega_{y1}} \frac{p_w v_0}{2} V^{4/3} \omega_{y1} - p_w g V h \sin \theta \cos \psi - p(z_p \cos \theta + y_p \sin \theta) \cos \psi; \quad (1.5)$$

$$(J_{y1} + \lambda_{55}) \dot{\omega}_{y1} + \lambda_{35} \dot{v}_{z1} = m_{y1}^{\beta} \frac{p_w v_0}{2} V v_{z1} + m_{y1}^{\omega_{x1}} \frac{p_w v_0}{2} \omega_{x1} V^{4/3} + m_{y1}^{\omega_{y1}} \frac{p_w v_0}{2} \omega_{y1} V^{4/3} + \omega_{x1} \lambda_{26} v_{y1} + v_{x1} \lambda_{35} \omega_{y1} + p(x_p \cos \psi \sin \theta + z_p \sin \psi); \quad (1.6)$$

где  $p_w$  – плотность воды;  $V$  – водоизмещение объекта;  $v_{x1}$  – проекция скорости объекта на ось  $OX_1$ ;  $v_{y1}$  – проекция скорости объекта на ось  $OY_1$ ;  $v_0$  – абсолютная величина вектора скорости объекта;  $\omega_{z1}$  – угловая скорость вращения объекта относительно оси  $OZ_1$ ;  $J_{z1}$  –

момент инерции корпуса глайдера относительно оси  $OZ_1$ ;  $\lambda_{11}, \lambda_{22}$  – присоединенные массы корпуса глайдера;  $\lambda_{26}$  – присоединенный статический момент корпуса глайдера;  $\lambda_{66}$  – присоединенный момент инерции корпуса глайдера;  $c_{x1}, c_{y1}, m_{z1}$  – коэффициенты позиционных гидродинамических сил и моментов;  $c_{y1}^{\omega z1}, m_{z1}^{\omega z1}$  – коэффициенты вращательных гидродинамических сил и моментов;  $p$  – избыточная плавучесть;  $x_p, y_p$  – плечи избыточной плавучести в связанной системе координат,  $\psi$  – угол дифферента,  $v_{z1}$  – проекция скорости объекта на ось  $OZ_1$ ;  $\omega_{x1}$  – угловая скорость вращения объекта относительно оси  $OX_1$ ;  $\omega_{y1}$  – угловая скорость вращения объекта относительно оси  $OY_1$ ;  $I_{x1}$  – момент инерции корпуса глайдера относительно оси  $OX_1$ ;  $J_{y1}$  – момент инерции корпуса глайдера относительно оси  $OY_1$ ;  $\lambda_{33}$  – присоединенная масса корпуса глайдера;  $\lambda_{35}$  – присоединенный статический момент корпуса глайдера;  $\lambda_{44}, \lambda_{55}$  – присоединенные моменты инерции корпуса глайдера;  $c_{z1}^{\beta}, m_{x1}^{\beta}, m_{y1}^{\beta}$  – коэффициенты позиционных производных гидродинамических сил и моментов;  $c_{z1}^{\omega z1}, m_{x1}^{\omega z1}, m_{y1}^{\omega z1}, m_{x1}^{\omega y1}, m_{y1}^{\omega y1}$  – коэффициенты вращательных производных гидродинамических сил и моментов;  $h$  – метацентрическая высота;  $z_p$  – плечо избыточной плавучести в связанной системе координат;  $\theta$  – угол крена;  $\varphi$  – угол курса.

В качестве основных параметров управления используются коэффициенты  $p$  и  $z_p$ .

Синтезируем регулятор на основе позиционно-траекторного закона управления ПО с учетом изменения параметра плеча избыточной плавучести  $z_p$ .

### Синтез системы управления

Процесс разработки регулятора для подводного глайдера, описанного в работе [1] разделяется на несколько основных этапов:

формирование функций целевой траектории  $y(x)$  и  $z(x)$ . Данная функция должна отражать цель управления в виде ошибки замкнутой системы;

формирование траекторной ошибки на основе разности координат заданной и текущей траектории глайдера;

вычисление переменных управления  $p$  и  $z_p$ .

При решении задачи синтеза системы управления разделим ее на две части:

система управления движением глайдера в плоскости  $Ox_1Y_1$ , что соответствует продольному перемещению объекта;

система управления движением в плоскости  $Ox_1Z_1$ , что соответствует боковому перемещению и маневрированию глайдера.

Определим ошибку замкнутой системы управления глайдера в плоскости  $Ox_1Y_1$

(2):

$$e_y = y - y_0, \quad (2)$$

где  $y_0$  – функция желаемой траектории движения глайдера,  $y_0 = A \sin(\omega t) + A_m$ , где  $A$  – амплитуда погружения глайдера;  $\omega$  – частота погружения,  $A_m$  – средняя глубина траектории, данный параметр отвечает за глубину вдоль которой движется аппарат с заданной амплитудой погружения  $A$ .

Подставив функцию желаемой траектории глайдера в выражение получим полное значение искомой ошибки (3):

$$e_y = y - A \sin(\omega t) - A_m. \quad (3)$$

В соответствии с методом позиционно-траекторного управления, введем уравнение, для выполнения требования асимптотической устойчивости (4):

$$e_y'' + a_1 e_y' + a_2 e_y = 0, \quad (4)$$

где  $e_y$  – ошибка, включающая в себя разность между действительной траекторией движения глайдера на плоскости  $Ox_1Y_1$  и его желаемой траекторией;  $a_1, a_2$  – коэффициенты настройки управления регулятора.

Поскольку управление организовано за счет задания закона изменения плавучести, то необходимо вывести функцию  $p$  из уравнения (4).

Продифференцировав выражения (1.1–1.6) и подставив необходимые значения из математической модели в уравнение (4), можно выразить значения переменной плавучести  $p$  (5):

$$\begin{aligned} P_{\text{знам}} &= -A\omega^2 \sin(\omega t) - a_{11} [(a_{12}v_{x1} + a_{22}v_{y1} + a_{32}v_{z1}) - A\omega \cos(\omega t)] - \\ &a_2 [y - -A \sin(\omega t) + A_m] - \frac{a_{22}A1}{\rho_w V + \lambda_{22}} - a_{22} \left[ \frac{J_{z2} + \lambda_{22}}{\det O} A2 + \frac{-\lambda_{22}}{\det O} A3 \right] - a_{32} \left[ \frac{J_{y2} + \lambda_{22}}{\det O_2} (A4 - \right. \\ &A5) + \left. + \frac{-\lambda_{22}}{\det O_2} (A6 + A7) \right] - \dot{a}_{12}v_{x1} - \dot{a}_{22}v_{y1} - \dot{a}_{32}v_{z1} \\ &; \\ P_{\text{числ}} &= \frac{\cos \psi}{\rho_w V + \lambda_{22}} + a_{22} \left[ \frac{J_{z2} + \lambda_{22}}{\det O} \cos \psi + \frac{-\lambda_{22}}{\det O} (x_p \cos \psi - y_p \sin \psi) \right] - \\ &- a_{32} \left[ \frac{J_{y2} + \lambda_{22}}{\det O_2} \cos \psi \sin \theta - \frac{-\lambda_{22}}{\det O_2} (x_p \cos \psi \sin \theta - z_p \sin \psi) \right] \\ &; \\ p &= P_{\text{знам}} / P_{\text{числ}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $a_{12} = \sin \psi$ ;

$$a_{22} = \cos \psi \cos \theta;$$

$$a_{32} = -\cos \psi \sin \theta;$$

$$\dot{a}_{12} = \cos \psi (\omega_{z1} \cos \theta + \omega_{y1} \sin \theta);$$

$$\dot{a}_{22} = -\sin \psi \cos \theta (\omega_{z1} \cos \theta + \omega_{y1} \sin \theta) - \cos \psi \sin \theta (\omega_{x1} - \tan \psi (\omega_{x1} \cos \theta - \omega_{z1} \sin \theta));$$

;

$$\dot{a}_{32} = \sin \psi \sin \theta (\omega_{x1} \cos \theta + \omega_{y1} \sin \theta) - \cos \psi \cos \theta (\omega_{x1} - \tan \psi (\omega_{x1} \cos \theta - \omega_{z1} \sin \theta));$$

;

$$\det O = (\rho_w V + \lambda_{22})(J_{z2} + \lambda_{22}) - \lambda_{22}^2;$$

$$\det O_2 = (\rho_w V + \lambda_{11})(J_{y2} + \lambda_{22}) - \lambda_{22}^2;$$

$$A1 = c_{x1} \frac{p_w v_0^2}{2} V^{2/3} + (p_w V + \lambda_{22}) v_{y1} \omega_{x1} + \lambda_{26} \omega_{z1}^2;$$

$$A2 = c_{y1} \frac{p_w v_0^2}{2} V^{2/3} + c_{y1}^{\omega_{z1}} \frac{p_w v_0}{2} \omega_{z1} V - (p_w V + \lambda_{11}) v_{x1} \omega_{z1};$$

$$A3 = m_{z1} \frac{p_w v_0^2}{2} V + m_{z1}^{\omega_{z1}} \frac{p_w v_0}{2} \omega_{z1} V^{4/3} - p_w V g h \sin \psi - \lambda_{26} v_{x1} \omega_{z1};$$

$$A4 = c_{z1}^{\beta} \frac{p_w v_0}{2} V^{2/3} v_{z1} + c_{z1}^{\omega_{z1}} \frac{p_w v_0}{2} \omega_{z1} V;$$

$$A5 = \omega_{x1} (p_w V + \lambda_{22}) v_{y1} + \omega_{y1} (p_w V + \lambda_{11}) v_{x1};$$

$$A6 = m_{y1}^{\beta} \frac{p_w v_0}{2} V v_{z1} + m_{y1}^{\omega_{x1}} \frac{p_w v_0}{2} \omega_{x1} V^{4/3} + m_{y1}^{\omega_{y1}} \frac{p_w v_0}{2} \omega_{y1} V^{4/3};$$

$$A7 = \omega_{x1} \lambda_{26} v_{y1} + v_{x1} \lambda_{35} \omega_{y1}$$

– сокращения, введенные для упрощения расчета.

Далее определим систему управления глайдером в режиме маневрирования. В данном случае поставлена задача движения по заданным точкам. При изменении параметра  $z_p$  возникает угол крена, который позволяет глайдеру поворачивать в заданном направлении. Этот принцип можно использовать для системы управления глайдером в координатной плоскости  $Ox_1z_1$ . Зададим желаемую траекторию движения как прямую линию, определенную уравнением (6):

$$z = kx + b, \tag{6}$$

где  $k$  – угловой коэффициент,  $b$  – свободный параметр (для упрощения примем за 0, тогда линия будет пролегать через начало координат).

Как известно, угловой коэффициент равен  $\frac{\Delta z}{\Delta x}$ . Примем  $k$  за желаемый угловой коэффициент, а  $k_s$  – за реальный.

$$k_s = \frac{\Delta z}{\Delta x} = \frac{z}{x} = \frac{(a_{1z} v_{x1} + a_{2z} v_{y1} + a_{3z} v_{z1})}{(a_{1x} v_{x1} + a_{2x} v_{y1} + a_{3x} v_{z1})}, \tag{7}$$

где  $a_{11} = \cos \varphi \cos \psi$ ;

$$\begin{aligned}a_{13} &= -\sin \varphi \cos \psi; \\a_{21} &= \sin \varphi \sin \theta - \cos \varphi \sin \psi \cos \theta; \\a_{23} &= \cos \varphi \sin \theta + \cos \varphi \sin \psi \sin \theta; \\a_{31} &= \sin \varphi \cos \theta + \cos \varphi \sin \psi \sin \theta; \\a_{33} &= \cos \varphi \sin \theta - \sin \varphi \sin \psi \sin \theta.\end{aligned}$$

Далее определим желаемый угловой коэффициент  $k$ . Поскольку на входе системы управления будут задаваться координаты точки, определим угловой коэффициент в виде (8):

$$k = \frac{\Delta z}{\Delta x} = \frac{z_1 - z_0}{x_1 - x_0}, \quad (8)$$

где  $x_1, z_1$  – координаты заданной точки,  $x_0, z_0$  – значения координат  $x$  и  $z$  в данный момент времени соответственно.

Эти значения получены при интегрировании уравнений 1. При использовании данного метода будет происходить постоянный перерасчет значения желаемого углового коэффициента  $k$ , что позволяет системе более точно управлять движением глайдера.

Определим ошибку системы управления глайдера в плоскости  $Ox_1z_1$  (9):

$$e_z = k_s - k. \quad (9)$$

Подставив (7) и (8), получим полное уравнение ошибки (10):

$$e_z = \frac{(a_{13}v_{x1} + a_{23}v_{y1} + a_{33}v_{z1})}{(a_{11}v_{x1} + a_{21}v_{y1} + a_{31}v_{z1})} - \frac{z_1 - z_0}{x_1 - x_0}. \quad (10)$$

Из моделирования движения глайдера в работах [4, 5] известно, что наибольшую устойчивость глайдера с параметрами, использованными в данной модели, обеспечивает изменение параметра  $z_p$  в пределах  $-0,445 < z_p < +0,445$ , причем отрицательное значение обеспечивает поворот влево, а положительное – вправо. Также известно, что при прохождении глайдера левее желаемой траектории ошибка углового коэффициента принимает отрицательное значение, правее – положительное. Таким образом значение параметра  $z_p$  можно представить в виде системы (11):

$$\begin{cases} z_p = 0; e_z = 0; \\ z_p = 0,445; e_z > 0; \\ z_p = 0,445; e_z < 0. \end{cases} \quad (11)$$

Для более плавного регулирования параметра  $z_p$  будет удобно воспользоваться логистической функцией (сигмоидой) вида  $f(x) = \frac{L}{1+e^{-k(x-x_0)}}$ , где  $L$  – максимум кривой,  $x_0$  –  $x$ -координата центра кривой,  $k$  – коэффициент крутизны функции. В случае данной системы управления, функция будет иметь вид (12):

$$z_p = 0,445 \left( \frac{2}{1+e^{-b e_z}} - 1 \right), \quad (12)$$

где  $b$  – коэффициент крутизны. График зависимости  $z_p$  от  $e_z$  при  $b = 20$  представлен на рис. 2.

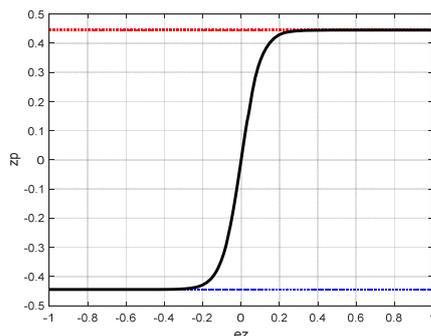
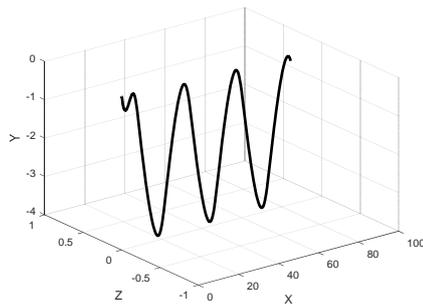


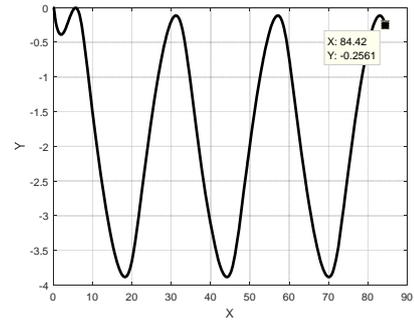
Рис. 2 – График зависимости  $z_p$  от  $e_z$

### Исследование системы управления

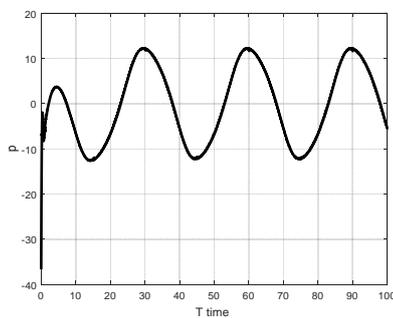
При исследовании синтезированного регулятора воспользуемся параметрами математической модели глайдера Нептун [6, 7]. Исходя из закона управления переменной плавучестью (5), рассмотрим пример моделирования системы управления подводным глайдером при продольном движении в плоскости  $Ox_1y_1$ . Используя функцию (5) в модели движения 1, получим следующие графики движения, представленные на рис. 3.



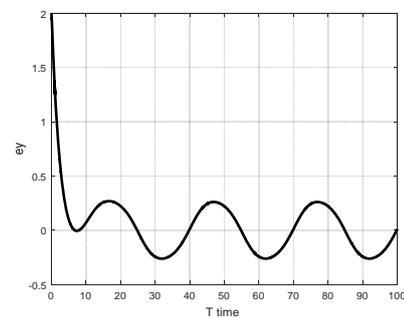
а) траектория движения



б) проекция траектории на  
плоскость **OXY**



с) значение плавучести **p**



д) значение ошибки **ey**

Рис. 3 – Графики зависимости различных параметров глайдера при продольном движении

При моделировании данной траектории не было учтено регулирование параметра  $z_p$ , его значение было принято за ноль. Были выбраны следующие параметры синусоиды: амплитуда  $A = 2$  м, средняя глубина  $A_{\text{ит}} = 2$  м, период  $T = 30$  с. За 100 с глайдер преодолевает расстояние в 84 м со средней скоростью  $v_{x1} = 0,84 \text{ м/с}$ , при этом совершая три полных цикла погружения/всплытия. Ошибка  $e_y$  после выхода на установленный режим по модулю не превышает 0,26 м.

Данное управление позволяет менять глубину погружения, амплитуду и период траектории, как показано на рис. 4.

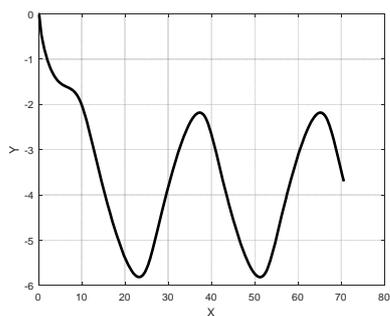
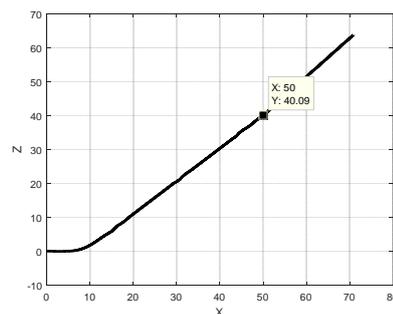
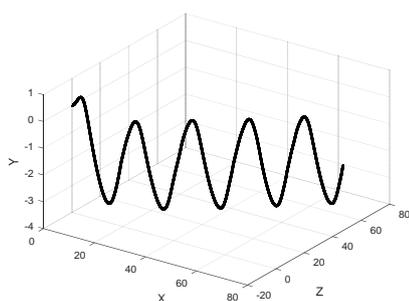
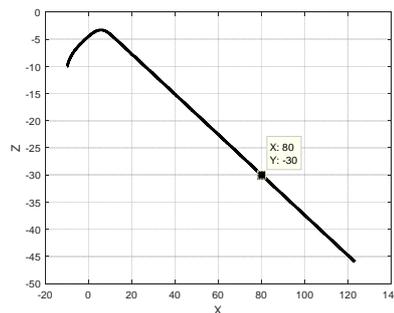
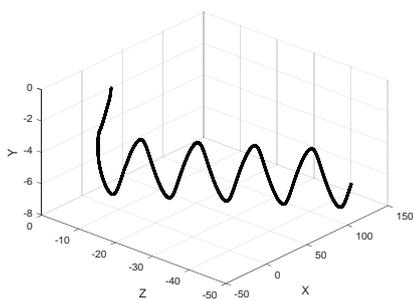


Рис. 4 – движение вдоль глубины  $A_m = 4$  м с амплитудой  $A = 2$  м и периодом  $T = 40$  с

Для проверки адекватности системы управления зададим различные параметры как синусоиды, так и разные координаты конечной точки. Результаты представлены на рис. 5.



a) траектория при  $A_m = 2$  м,  $A = 2$  м,  $T = 20$  с, конечная точка (50; 40)

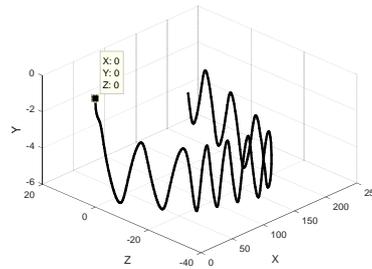


b) траектория при  $A_m = 2$  м,  $A = 6$  м,  $T = 40$  с, начальная точка (-10; -10), конечная точка (50; 40)

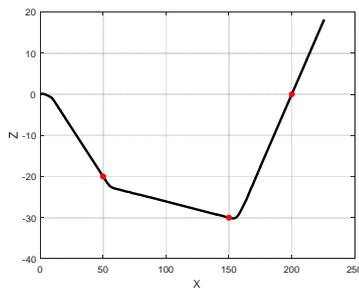
Рис. 5 – Движение глайдера в точку при различных параметрах

Как видно из графиков на рис. 5, глайдер достигает заданной точки на горизонтальной плоскости с минимальными отклонениями, при этом перемещаясь по заданной синусоиде в вертикальной плоскости.

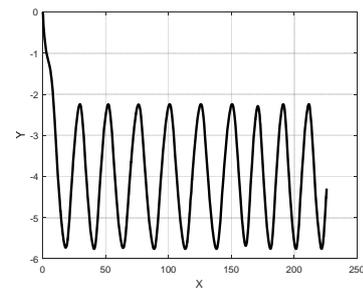
Представленная выше система управления имеет возможность задания нескольких точек для последовательного движения по ним. В следующем примере заданы три точки (50; -20), (150; -30), (200; 0). Графики данной траектории представлены на рис. 6.



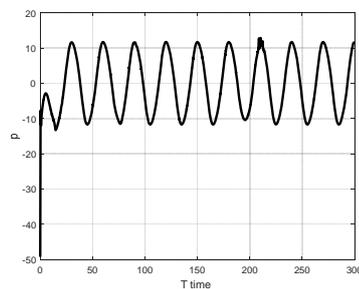
a) траектория движения



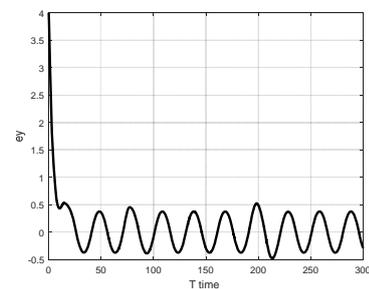
b) проекция траектории на плоскость **OXZ** (отмечены заданные точки)



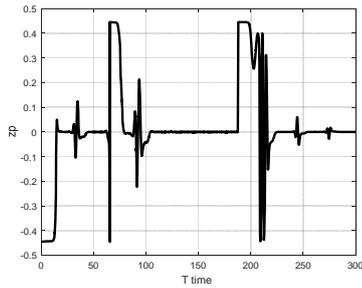
c) проекция траектории на плоскость **OXY**



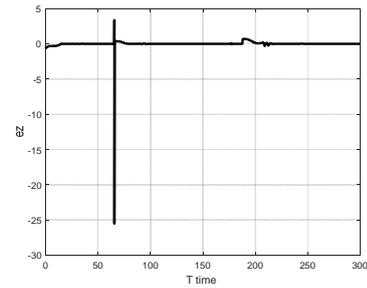
d) значение плавучести **p**



e) значение ошибки **e<sub>y</sub>**



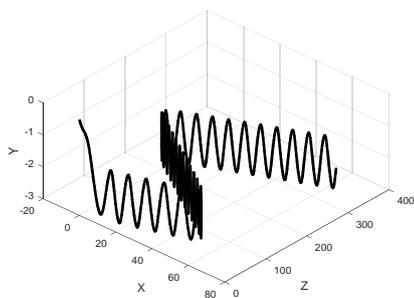
f) значение ошибки  $z_p$



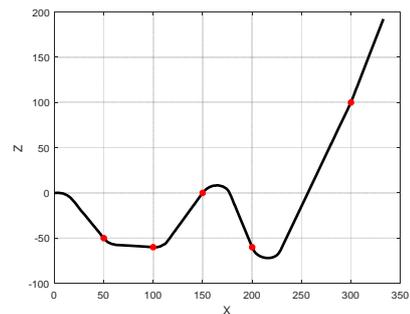
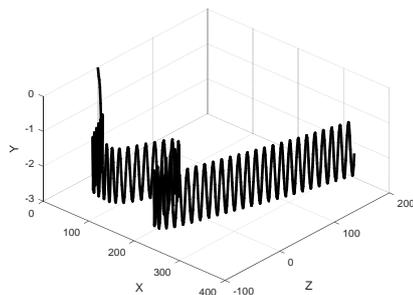
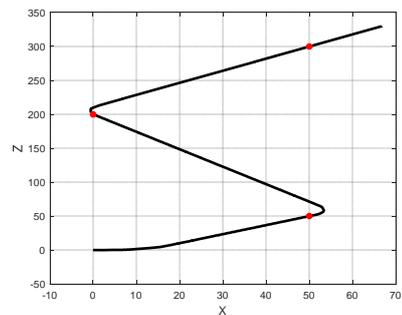
g) значение ошибки  $e_z$

Рис. 6 – Графики движения по трем заданным точкам

На рис. 6 изображена траектория последовательного прохождения глайдера через три заданные точки. Параметры синусоиды при моделировании равны  $A_m = 2$  м,  $A = 4$  м,  $T = 30$  с. По импульсам точки смещения точки плавучести  $z_p$  прослеживаются моменты времени, когда глайдер достигает первой и второй точки – это  $t=68,5$  с и  $t=187,5$  с, так как после их прохождения глайдеру необходимо значительно скорректировать свой курс, что подтверждается графиками. Другие примеры траекторий движения по трем точкам изображены на рис. 7.



а) траектория для точек (50; 50), (0; 200), (50; 300)



- b) траектория для точек (50; -50), (100; -60), (150; 0), (200; -60), (300; 100)

Рис. 7 – Траектории с различными заданными точками

Наиболее распространенными типами задач, решаемых сегодня с помощью АНПА, являются обзорно-поисковые и инспекционные работы. Такие работы выполняются, как правило, с помощью площадной съемки выбранных районов донной поверхности и последующего обследования обнаруженных объектов. Как правило, типичная миссия АНПА по обследованию акватории состоит из фрагментов площадного и точечного обследований [8].

Для обследования территорий используются элементы покрытия – фигуры, которые позволяют оптимально охватить исследуемую акваторию при прохождении по ней АНПА с учетом спецификации миссии. К элементам покрытия относятся: меандр и зигзаг.

Меандр обеспечивает оптимальное покрытие исследуемой территории, поскольку не содержит повторных покрытий и возвратных движений. Пример такого меандра изображен на рисунке 8.

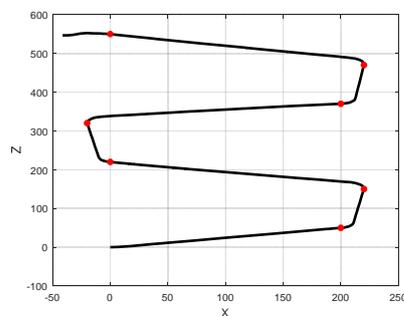
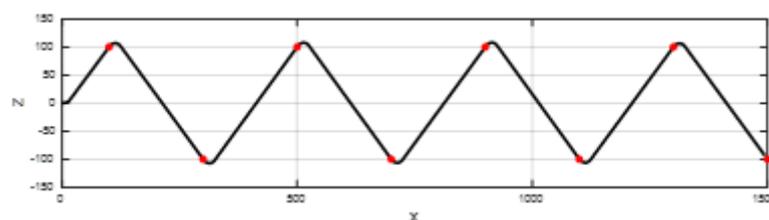


Рис. 8 – Фигура типа меандр

Если есть необходимость обследовать подводные коммуникации, применяется зигзагообразная траектория, изображенная на рис. 9. Галсы располагаются под углом к направлению объекта (кабеля или трубопровода).



## Рис. 9– Фигура типа зигзаг

Разработанная система управления позволяет использовать предложенный алгоритм движения по точкам для реализации элементов покрытия.

### Выводы

В результате моделирования были получены траектории движения глайдера по заданным в горизонтальной плоскости точкам с учетом параметров траектории для движения в вертикальной плоскости. Полученные результаты позволяют оценить адекватность разработанной системы управления. Отклонение системы при достижении глайдером заданной точки является минимальным, а с помощью параметров траектории в вертикальной плоскости имеется возможность управлять глубиной погружения и скоростью движения. Приведённые выше результаты симуляции элементов покрытия доказывают возможность практического использования системы управления при планировании миссий АНПА глайдерного типа. Результаты симулирования схожи с работами [9, 10] и подтверждают возможность использования схемы без аппарата смещения центра масс.

### Благодарность

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 18-38-00441 (в части разработки позиционно-траекторного регулятора) и при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых МК-3089.2017.8 (в части исследования движения в среде Matlab).*

### Литература

1. Маевский А.М, Костюков В.А. Разработка системы управления для АНПА «Neptune» типа глайдер на базе позиционно-траекторного регулятора. // Материалы 7-й школы-семинара «Молодежно-студенческие разработки и творческие проекты для исследования и освоения прибрежно-шельфовых зон юга России». Геленджик: Филиал Южного Федерального Университета в г. Геленджике, 2016. С. 150-155.
2. Пшихопов В.Х. Позиционно-траекторное управление подвижными объектами. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 173 с.
3. Пшихопов В.Х., Федотов А.А., Медведев М.Ю., Медведева Т.Н., Гуренко Б.В. Позиционно-траекторная система прямого адаптивного управления морскими

подвижными объектами // Cyberleninka.ru URL: [cyberleninka.ru/article/n/pozitsionno-traektnaya-sistema-pryamogo-adaptivnogo-upravleniya-morskimi-podvizhnymi-obektami](http://cyberleninka.ru/article/n/pozitsionno-traektnaya-sistema-pryamogo-adaptivnogo-upravleniya-morskimi-podvizhnymi-obektami) (дата обращения: 26.04.2017).

4. Сухоруков А.Л., Титов М.А. Об использовании эффекта планирования для движения подводных аппаратов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. №4. С. 88-101.

5. Сухоруков А.Л., Титов М.А. Об устойчивости подводного планера-глайдера на балансировочных режимах движения // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. №3. С. 66-79.

6. Гуренко Б.В., Назаркин А.С. Реализация и идентификация параметров автономного необитаемого подводного аппарата типа глайдер // Инженерный вестник Дона. 2015. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3288](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3288)

7. Гуренко Б.В. Построение и исследование математической модели автономного необитаемого подводного аппарата // Инженерный вестник Дона. 2014. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2626](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2626)

8. Багницкий А.В., Инзарцев А.В. Автоматизация подготовки миссии для АНПА в задачах обследования акваторий // Подводные исследования и робототехника. 2010. №2. С. 17-24.

9. J. G. Graver. Underwater gliders: dynamics, control and design: дис. PhD in mechanical and aerospace engineering. Princeton University. 2005. 273 с.

10. N. Mahmoudian, C. Woolsey Underwater glider motion control // 47th IEEE Conference on Decision and Control. 2008. С. 552-557.

## References

1. Maevskiy A.M, Kostyukov V.A. Shkola-seminar «Molodezhno-studencheskie razrabotki i tvorcheskie proekty dlya issledovaniya i osvoeniya pribrezhno-shel'fovykh zon yuga Rossii». (Proc. 7<sup>th</sup> school-seminar “Student research projects and creative projects for researching and developing coastal areas of south of Russia”). Gelendzhik, 2016, pp. 150-155.

2. Pshikhov V.Kh. Pozitsionno-traektnoe upravlenie podvizhnymi ob"ektami. [Position-trajectory control of moveable objects] Taganrog: TTI YuFU, 2009. 183 pp.

3. Pshikhov V.Kh., Fedotov A.A., Medvedev M.Yu., Medvedeva T.N., Gurenko B.V. Cyberleninka.ru URL: [cyberleninka.ru/article/n/pozitsionno-traektnaya-sistema-pryamogo-adaptivnogo-upravleniya-morskimi-podvizhnymi-obektami](http://cyberleninka.ru/article/n/pozitsionno-traektnaya-sistema-pryamogo-adaptivnogo-upravleniya-morskimi-podvizhnymi-obektami)



4. Sukhorukov A.L., Titov M.A. Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika. 2012. №4. pp. 88-101.
5. Sukhorukov A.L., Titov M.A. Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika. 2016. №3. pp. 66-79.
6. Gurenko B.V., Nazarkin A.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2015. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3288](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3288)
7. Gurenko B.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2014. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2626](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2626)
8. Bagnitskiy A.V., Inzartsev A.V. Podvodnye issledovaniya i robototekhnika. 2010. №2. pp. 17-24.
9. J. G. Graver. Underwater gliders: dynamics, control and design: PhD thesis in mechanical and aerospace engineering. Princeton University. 2005. 273 pp.
10. N. Mahmoudian, C. Woolsey Underwater glider motion control. 47th IEEE Conference on Decision and Control. 2008. pp. 552-557.