

# ОБ ОДНОЙ ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ МОРСКИМ НЫРЯЮЩИМ ДРИФТЕРОМ

Барabanов А.Т., Быкова Е.С.,  
Краснодубец Л.А., Старинская Д.Н.

Севастопольский национальный  
технический университет  
г. Севастополь  
E-mail: tk@sevgtu.sebastopol.ua

*Рассматривается модель движения ныряющего дрифтера, предназначенного для измерения параметров морской среды. Предложен подход к анализу автоколебательного режима, позволяющий синтезировать параметры САУ глубиной погружения.*

**Введение.** Дрейфующие буи со спутниковой связью, или дрифтеры, на сегодняшний день являются существенной частью системы наблюдений за Мировым океаном. Так как для исследования океана большое значение имеют эксперименты по изучению глубинных профилей, возникает задача управления ныряющим буюм. При этом под управлением понимается задача стабилизации ныряющего буя на заданной глубине.

Принцип действия дрифтера, как подводного устройства поплавкового типа, может быть основан на периодическом изменении соотношения между его весом и водоизмещением путем приема и вытеснения водяного балласта. Согласно [1], поплавковое устройство такого типа совершает колебательные движения относительно заданной глубины  $h_0 > 0$  с амплитудой, определяемой верхней  $h_2$  и нижней  $h_1$  глубинами срабатывания балластной системы ( $0 < h_2 < h_0 < h_1$ ). При всплытии буя в момент достижения глубины  $h_2$  происходит прием балласта (заборной воды), при погружении в момент достижения глубины  $h_1$  – вытеснение балласта. Система автоматического управления дрейфующим буюм в данном режиме эксплуатации может рассматриваться как автоколебательная система управления релейного типа с обратной связью.

Важной представляется проблема выбора параметров, обеспечивающих нужный режим (определенной амплитуды, частоты) колебаний дрифтера. В настоящей работе рассматривается задача расчета автоколебаний при допущении, что вытеснение и

прием балласта происходят мгновенно.

**Математическая модель дрифтера как управляемого поплавкового устройства.** Система уравнений и математическая модель движения поплавкового устройства предложена в [1]. С учетом указанного допущения модель дрифтера будут составлять следующие нелинейные дифференциальные уравнения для отклонения текущей глубины от заданной  $z(t) = h_0 - h(t)$ :

1) уравнение движения во время погружения

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + K_1 \frac{dz}{dt} \left| \frac{dz}{dt} \right| + K_2 \left( \frac{1}{r+1} \right) = 0; \quad (1)$$

2) уравнение движения во время всплытия

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + K_1 \frac{dz}{dt} \left| \frac{dz}{dt} \right| - K_2 \left( \frac{r}{r+1} \right) = 0, \quad (2)$$

где  $r$  – коэффициент плавучести буя,  $K_1, K_2$  – постоянные системы, зависящие от параметров дрифтера и морской среды.

В модели (1,2) можно выделить две нелинейности: нечетно-симметричную нелинейность  $K_1 \frac{dz}{dt} \left| \frac{dz}{dt} \right|$ , возникающую в результате действия силы гидродинамического сопротивления, и нелинейность релейного типа, связанную с действием вынуждающей (управляющей) силы.

Для теоретического анализа модель (1,2) рассмотрим в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= v, \\ \frac{dv}{dt} &= -\Phi_1(v) - \Phi_2(z, v) \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где  $\Phi_1 = K_1 v |v|$ ,  $v = dz/dt$  – скорость буя,  $\Phi_2$  – нелинейность, возникающая вследствие действия вынуждающей силы. В силу указанного выше принципа управления нелинейность  $\Phi_2$  представляет собой релейную гистерезисную характеристику, в общем случае – несимметричную. Здесь будет рассматриваться случай симметричной характеристики при  $r = 1$ , как и в [1]. Для этого случая введем обозначения:  $c = K_2/(r+1) = K_2 r/(r+1) = K_2/2$ ,  $b = z_2 = -z_1$ , где  $z_2 = h_0 - h_2$ ,  $z_1 = h_0 - h_1$  и, следовательно,  $h_0 = (h_1 + h_2)/2$ . Соответствующий вид нелинейности  $\Phi_2(z, \dot{z})$  указан на рисунке 1.

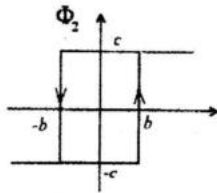


Рисунок 1 – Вид нелинейной характеристики  $\Phi_2$

**Анализ автоколебательного движения бую методом фазовой плоскости.** Фазовый портрет системы в режиме автоколебаний представлен на рисунке 2.

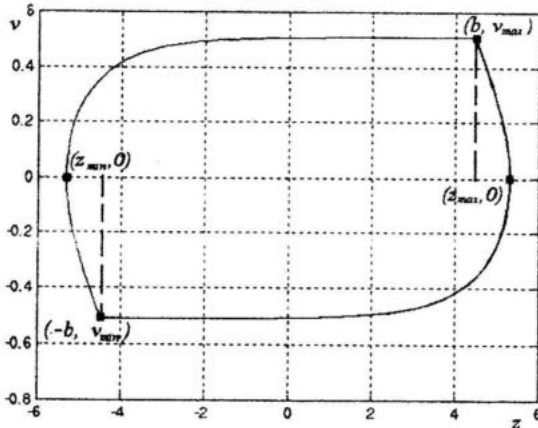


Рисунок 2 – Фазовый портрет системы

Имеет место предельный цикл, параметры которого обозначим следующим образом:  $z_{\max}$ ,  $z_{\min}$  – максимальное и минимальное значения координаты  $z$ ,  $v_{\max}$ ,  $v_{\min}$  – максимальное и минимальное значения скорости. Уравнения (3) приведем к виду:

$$v \frac{dv}{dz} = -\Phi_1(v) - \Phi_1(z, v). \quad (4)$$

Будем рассматривать уравнение (4) в четырех областях фазовой плоскости:  $D_1 = \{(z, v): z > b, v > 0\}$ ,  $D_2 = \{(z, v): z \geq -b, v < 0\}$ ,  $D_3 = \{(z, v): z < -b, v < 0\}$ ,  $D_4 = \{(z, v): v > 0, z \leq b\}$ . Интегрируя (4) по фрагментам фазовой траектории, принадлежащим этим областям, получим

$$\left. \begin{aligned} \ln |K_1 v^2 + c| + 2K_1 z &= \text{const}, \\ \ln |K_1 v^2 - c| - 2K_1 z &= \text{const}, \\ \ln |K_1 v^2 + c| - 2K_1 z &= \text{const}, \\ \ln |K_1 v^2 - c| + 2K_1 z &= \text{const} \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

В силу этих уравнений для граничных точек фрагментов будем иметь

$$\left. \begin{aligned} \ln |K_1 v_{\max}^2 + c| + 2K_1 b &= \ln c + 2K_1 z_{\max}, \\ \ln c - 2K_1 z_{\max} &= \ln |K_1 v_{\min}^2 - c| + 2K_1 b, \\ \ln |K_1 v_{\min}^2 + c| + 2K_1 b &= \ln c - 2K_1 z_{\min}, \\ \ln c + 2K_1 z_{\min} &= \ln |K_1 v_{\max}^2 - c| + 2K_1 b \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Из уравнений (6) следует, что

$$\begin{aligned} v_{\max} &= -v_{\min} \\ z_{\max} &= -z_{\min} = \frac{1}{4K_1} \ln \left| \frac{K_1 v^2 + c}{K_1 v^2 - c} \right|. \end{aligned} \quad (7)$$

Для определения максимального значения скорости из (6) получим

$$\ln |(K_1 v_{\max}^2 + c)(K_1 v_{\max}^2 - c)| = -4K_1 b + 2 \ln c,$$

откуда следует

$$v_{\max}^4 = \frac{1}{K_1^2} (c^2 \pm c^2 e^{-4K_1 b}). \quad (8)$$

Уравнение (8) имеет два положительных решения. Можно показать, что уравнение (8) должно рассматриваться при условии  $K_1 v^2 / c < 1$ . Из этого следует, что нужное решение имеет вид

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{c}{K_1}} \sqrt[4]{1 - e^{-4K_1 b}}. \quad (9)$$

В силу (9) из (7) следует, что  $z_{\max}$  не зависит от  $c$ , а, следовательно, и от  $K_2$ .

Для определения периода автоколебаний, т.е. времени движения точки по предельному циклу, представим (3) в виде

$$-\frac{dv}{\Phi_1(v) + \Phi_1(z, v)} = dt.$$

Проинтегрировав это уравнение по фрагментам фазовой траектории, получим

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{\sqrt{cK_1}} \ln \left| \frac{v_{\max} + \sqrt{c/K_1}}{v_{\max} - \sqrt{c/K_1}} \right| + \\ &+ \frac{2}{\sqrt{cK_1}} \arctg \sqrt{\frac{K_1}{c}} v_{\max}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $T$  – период автоколебаний.

**Пример.** При численных значениях параметров  $r = 1$ ,  $b = 4,5 \text{ м}$ ,  $K_1 = 0,42 \text{ м}^{-1}$ ,

$K_2 = 0,218 \text{ м/с}^2$ , взятых из [1], расчет с помощью формул (7), (8), (10) дает следующие значения параметров автоколебаний:  $z_{\max} = 5,3250 \text{ м}$ ,  $v_{\max} = 0,5094 \text{ м/с}$ ,  $T = 52,3916 \text{ с}$ ,  $\omega = 2\pi/T = 0,1199 \text{ рад/с}$ .

Полученные соотношения устанавливают зависимость параметров автоколебаний от параметров системы. На рисунках 3, 4

представлены графики зависимостей параметров автоколебаний от коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$ , построенные по соотношениям (7), (9), (10).

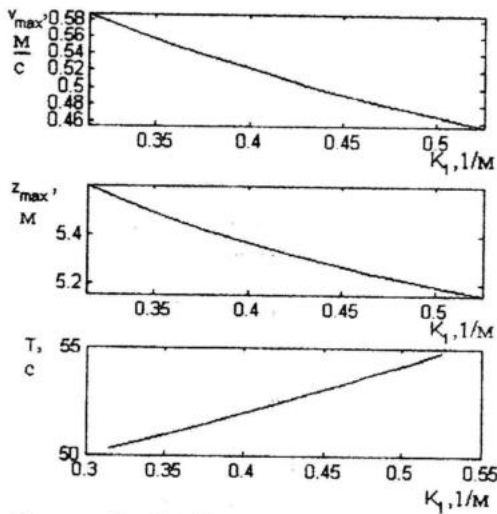


Рисунок 3 – Графики зависимостей параметров автоколебаний от коэффициента  $K_1$

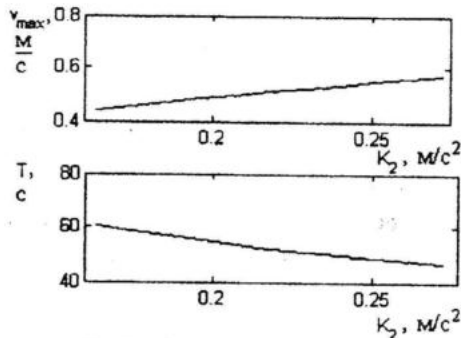


Рисунок 4 – Графики зависимостей параметров автоколебаний от коэффициента  $K_2$

Полученные графики позволяют определить параметры буя, соответствующие требуемым значениям параметров автоколебаний.

**Выводы.** Отметим, что полученные результаты при сделанном допущении о мгновенности приема и вытеснения балласта определяют точные зависимости параметров автоколебаний от параметров системы. При небольших по сравнению с периодом колебаний интервалах приема и вытеснения балласта ошибка в этих результатах достаточно мала. Однако она возрастает с увеличением указанных интервалов, что видно по результатам моделирования (см. рисунок 5), учитывающего фазы приема и вытеснения балласта согласно [1]. На рисунке 5 показано влияние длительности интервалов вытеснения  $\Delta t_e$  и приема  $\Delta t_n$  балласта на относительную ошибку в % определения периода и амплитуды автоколебаний при  $\Delta t_e = \Delta t_n$ .

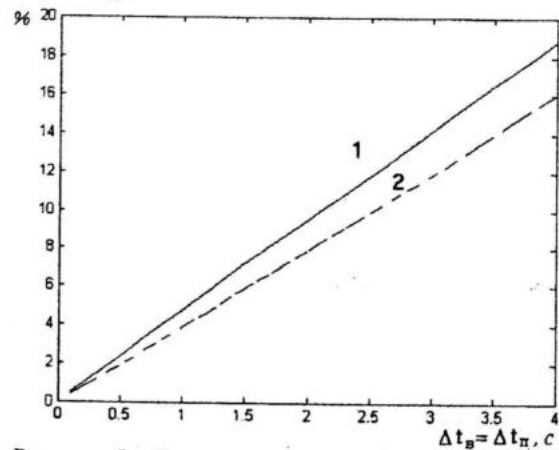


Рисунок 5 – Результаты моделирования движения дрейфтера: 1 – относительная ошибка определения амплитуды, 2 – относительная ошибка определения периода автоколебаний

## ЛИТЕРАТУРА

1. Meyer J. A. Motion response and design of an underwater flotation mechanism. «Paper. Amer. Soc. Mech. Eng.», 1969, №UNT-9, 24 xi, 12 pp., ill.