

УДК 681.511.2

Т.А. Езангина, С.А. Гайворонский, И.В. Хожаев

## Управление зарядной станцией для автономного подводного аппарата

Разрабатывается система управления движением зарядной станции, спускаемой с судна-носителя на кабель-тросе в условиях морской качки. При этом рассматривается режим погружения зарядной станции на большую глубину и последующий режим стабилизации ее положения. Для указанных режимов разработана математическая модель системы управления с учетом распределенности массы длинного кабель-троса, интервальной неопределенности параметров звена «трос – зарядная станция» и наличия трения кабель-троса о воду. С целью компенсации влияния морской качки в указанных режимах предлагается использовать линейный робастный регулятор, управляющий установленной на зарядной станции амортизирующей лебедкой. На основе коэффициентного метода проведены параметрический синтез робастного регулятора и моделирование системы управления зарядной станцией.

**Ключевые слова:** зарядная станция, интервальная неопределенность, распределенные параметры, математическая модель, присоединенная масса воды, трение, морская качка.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2017-20-1-105-109

В настоящее время наблюдается активное исследование Мирового океана с помощью автономных подводных аппаратов. При этом, согласно [1–5], увеличение временного ресурса их работы возможно путем подзарядки аккумуляторов без подъема на судно. Для этого предлагается использовать спускаемые на кабель-тросе зарядные станции, к которым пристыковываются подводные аппараты. Однако морская качка может осложнить процесс спуска зарядной станции (ЗС) и ее стыковку.

Для компенсации влияния морской качки предлагается разработать системы автоматического управления ЗС. При их разработке необходимо учитывать, что некоторые физические параметры объектов управления могут изменяться в процессе функционирования по заранее неизвестным законам в определенных пределах или быть точно неизвестными (длина упругого кабель-троса и, следовательно, его параметры, масса ЗС, плотность воды). При движении ЗС необходимо учитывать также присоединенную массу воды, которая зависит от геометрических характеристик ЗС. При этом следует заметить, что если кабель-трос имеет значительную длину (сотни метров и даже километры), то он обладает существенной массой, доходящей до нескольких тонн. Потому при построении математической модели необходимо кабель-трос рассматривать как упругий элемент с распределенной по длине массой, а также следует учитывать наличие трения кабель-троса о воду.

Известный способ управления амортизирующей лебедкой [6] в режимах спуска и стабилизации ЗС основан на концепции многорежимного регулирования. Данный подход предусматривает наличие двух систем управления со своими регуляторами и блока переключения. При этом представляет интерес анализ возможности компенсации морской качки в рассматриваемых режимах с помощью одной системы управления с одним линейным робастным регулятором.

### Математическое описание электроприводов

Для разработки структурной схемы системы управления ЗС запишем уравнения для отдельных элементов системы. Уравнение вертикального движения ЗС имеет вид:  $m_{3C} \frac{dV_{3C}}{dt} = F_n$ , где  $m_{3C}$  – масса ЗС,  $V_{3C}$  – вертикальная скорость ЗС,  $F_n$  – сила натяжения в тросе.

Электропривод амортизирующей лебедки описывается уравнением  $J_2 \frac{d\omega_{АЛ}}{dt} = M_{дв} + M_n$ , где

$M_{дв}$  – управляющий момент привода амортизирующей лебедки (АЛ),  $J_2$  – момент инерции амортизирующей лебедки,  $\omega_{АЛ}$  – угловая скорость вращения барабана амортизирующей лебедки,  $M_n = F_n R_2$  – момент, создаваемый на амортизирующей лебедке силой натяжения троса,  $R_2$  – радиус барабана амортизирующей лебедки. При этом  $M_{дв} = k_{м2}(U_p - U_e)$ , где  $U_p$  – выходное напряжение регулятора амортизирующей лебедки;  $k_{м2}$  – коэффициент передачи привода амортизирующей лебедки по моменту;  $U_e = k_{e2}\omega$  – напряжение противоЭДС двигателя амортизирующей лебедки;  $k_{e2}$  – коэффициент противоЭДС двигателя амортизирующей лебедки. Напряжение  $U_p$ , поступающее на амортизирующую лебедку, формируется линейным регулятором, входной сигнал которого равен разности  $U_{ипс} - U_{зс1}$ , где  $U_{ипс}$  – напряжение измерительного преобразователя скорости ЗС,  $U_{зс1}$  – напряжение датчика скорости (ЗС1).

Математическое описание электропривода судовой лебедки (СЛ) аналогично описанию привода амортизирующей лебедки. При этом контур регулирования скорости судовой лебедки содержит отрицательную обратную связь по скорости  $\omega_{СЛ}$ , на

пряжение которой определяется уравнением  $U_{oc} = k_{oc} \omega_{cl}$ . Входное напряжение  $U_1$  судовой лебедки определяется усилителем с коэффициентом  $k_{yc}$  на основании выражения  $U_1 = k_{yc}(U_{3c1} - U_{oc})$ .

В качестве регулятора выбран пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор  $W_p(s) = (k_1 + k_2 s)/s$  ( $k_1$  и  $k_2$  – настройки регулятора), обеспечивающий в системе астатизм первого порядка.

#### Учет распределенности массы длинного троса

На основе [7] получим передаточные функции, описывающие законы передачи приращения силы натяжения длинного, обладающего значительной массой кабель-троса с одного его конца на другой. Введем обозначения:  $\Delta F_H^{BK}$  – приращение силы натяжения верхнего конца кабель-троса;  $\Delta F_H^{HK}$  – приращение силы натяжения нижнего конца кабель-троса;  $\Delta l_{HK}$  – удлинение нижнего конца кабель-троса;  $\Delta l_{BK}$  – удлинение верхнего конца кабель-троса;  $m_k$  – масса кабель-троса. Согласно [7] передаточная функция между удлинением кабель-троса на одном конце и приращением на нем силы натяжения имеет вид

$$W^l(s) = \frac{\Delta F_H^{BK}}{\Delta l_{BK}} = \frac{\Delta F_H^{HK}}{\Delta l_{HK}} = \frac{C_{удТ} \sqrt{b} \cdot ch(l\sqrt{b})}{sh(l\sqrt{b})}, \quad (1)$$

где  $b = \frac{s}{a^2}(s+2h)$ ,  $2h = \chi_{удТ}/m_k$ ,  $a^2 = C_{удТ}/m_k$ ,  $C_{удТ}$  – удельное значение коэффициента жесткости кабель-троса;  $\chi_{удТ}$  – удельное значение коэффициента демпфирования колебаний в кабель-тросе.

Заметим, что после появления приращения силы натяжения на одном конце кабель-троса оно передается на другой конец в соответствии с передаточной функцией

$$W^F(s) = \frac{\Delta F_H^{BK}}{\Delta F_H^{HK}} = \frac{\Delta F_H^{HK}}{\Delta F_H^{BK}} = \frac{1}{ch(\sqrt{lb})}. \quad (2)$$

Если гиперболические функции в выражениях (1) и (2) разложить в степенные ряды и ограничиться рассмотрением только двух первых членов  $ch(\sqrt{l^2 b}) = 1 + \frac{bl^2}{2}$ ;  $sh(\sqrt{l^2 b}) = \sqrt{l^2 b} (1 + \frac{l^2 b}{6})$ , то передаточные функции (1) и (2) примут вид

$$W^l(s) = \frac{\Delta F_H^{BT}}{\Delta l_{BT}} = \frac{\Delta F_H^{HT}}{\Delta l_{HT}} = 3C_{удТ} \frac{l_T^2 m_T s^2 + \chi_{удТ} l_T^2 s + 2C_{удТ}}{l_T^3 m_T s^2 + \chi_{удТ} l_T^3 s + 6C_{удТ} l_T}, \quad (3)$$

$$W^F(s) = \frac{\Delta F_H^{BT}}{\Delta F_H^{HT}} = \frac{\Delta F_H^{HT}}{\Delta F_H^{BT}} = \frac{2C_{удТ}}{l_T m_T s^2 + \chi_{удТ} l_T s + 2C_{удТ}}. \quad (4)$$

Таким образом, математическая модель длинного кабель-троса может быть представлена как объект с двумя входами (удлинениями на концах кабель-троса) и двумя выходами (приращениями сил натяжения на концах кабель-троса). Заметим, что такой кабель-трос следует отнести к классу многосвязных, поскольку удлинение любого его конца влияет не только на приращение натяжения на нем, но и на другом конце кабель-троса.

#### Учет трения троса о воду и присоединенной массы воды

При вертикальном движении упругого кабель-троса длиной  $l_T$ , если кабель-трос при этом растягивается или сжимается,  $F_{тр}$  будем рассматривать как сумму двух составляющих: силы трения  $F_{тр1}$  верхней части кабель-троса и силы трения  $F_{тр2}$  его нижней части. Если принять скорость верхней части кабель-троса равной  $V_{BK}$ , а нижней –  $V_{HK}$ , то  $F_{тр}$  предлагается определять следующим образом:

$$F_{тр} = F_{тр2} + F_{тр1} = 0,5k_T d \frac{l_T}{2} \rho V_{HK} + 0,5k_T d \frac{l_T}{2} \rho V_{BK} = 0,25k_T d l_T \rho (V_{HK} + V_{BK}), \quad (5)$$

где  $d$  – диаметр троса,  $\rho$  – плотность воды,  $k_T = 0,02 \div 0,025$  – безразмерный коэффициент.

Известно, что на движение тела в воде влияет присоединенная масса воды, которая добавляется к массе тела. Поэтому если ЗС массой  $m_{ЗС}^*$  движется в воде вертикально под действием силы  $F$ , то сопротивление воды пропорционально ускорению  $a$  ЗС и по основному закону динамики  $F = m_{ЗС}^* a$ , причем

$$m_{ЗС}^* = (m_{ЗС} + \mu), \quad (6)$$

где  $\mu$  – присоединенная масса воды. Она зависит от формы ЗС, направления его движения и плотности воды. В соответствии с [8] ЗС в форме параллелепипеда при спуске-подъеме имеет присоединенную массу воды

$$\mu = \frac{\pi \rho r^2 l_{ЗС}^2}{4\sqrt{r^2 + l_{ЗС}^2}} (1 - 0,425 \frac{r l_{ЗС}}{r^2 + l_{ЗС}^2}), \quad (7)$$

где  $r$  – ширина ЗС,  $l_{ЗС}$  – длина ЗС.

#### Учет интервальной неопределенности параметров

В системе рассматриваются следующие интервальные параметры:  $[l_T]$ ,  $[C_{удТ}]$ ,  $[\chi_{удТ}]$ ,  $[m_{ЗС}]$ ,  $[m_T]$ ,  $[\rho]$ . С учетом этих интервально – неопределенных параметров формулы (3)–(7) соответственно примут вид  $[F_{тр}] = 0,25k_T d [l_T] [\rho] (V_{HK} + V_{BK})$ ;

$$W^l(s) = \frac{\Delta F_H^{BT}}{\Delta l_{BT}} = \frac{\Delta F_H^{HT}}{\Delta l_{HT}} =$$

$$= 3[C_{удГ}] \frac{[L_T]^2 [m_T] s^2 + [\chi_{удГ}] [L_T]^2 s + 2[C_{удГ}]}{[L_T]^3 [m_T] s^2 + [\chi_{удГ}] [L_T]^3 s + 6[C_{удГ}] [L_T]};$$

$$W^F(s) = \frac{\Delta F_H^{BT}}{\Delta F_H^{HT}} = \frac{\Delta F_H^{HT}}{\Delta F_H^{BT}} =$$

$$= \frac{2[C_{удГ}]}{[L_T] [m_T] s^2 + [\chi_{удГ}] [L_T] s + 2[C_{удГ}]};$$

$$[\mu] = \frac{\pi[\rho]r^2 l^2}{4\sqrt{r^2 + l_{3C}^2}} (1 - 0,425 \frac{r l_{3C}}{r^2 + l_{3C}^2});$$

$$[m_{3C}^*] = ([m_{3C}] + [\mu]).$$

Таким образом, интервальная структурная схема системы управления ЗС, которая учитывает все указанные особенности объекта управления, приведена на рис. 1.

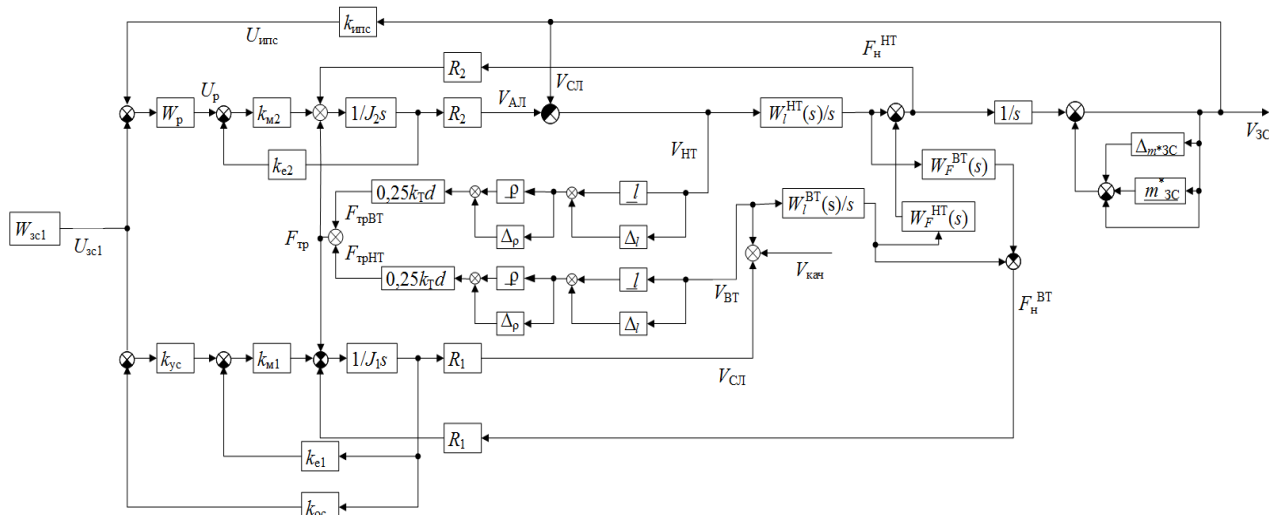


Рис. 1. Структурная схема системы управления ЗС

На основании полученной схемы выведены передаточные функции системы управления ЗС по возмущающему и управляющему воздействиям

$$W_{зам}(s) = \frac{V_{ЗС}(s)}{V_{кач}(s)} = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{\sum_{h=1}^{11} [b_{h4}] s^h}{\sum_{q=0}^{14} [a_q] s^q},$$

$$W_{зам}(s) = \frac{V_{ЗС}(s)}{U_{зс1}(s)} = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{\sum_{h_1=0}^{11} [b_{h_1}] s^{h_1}}{\sum_{q=0}^{14} [a_q] s^q}.$$

В результате применения алгоритма [4] найдены параметры регулятора  $k_1=2500$ ,  $k_2=5200$  и максимальная робастная степень устойчивости  $\alpha=0,05$ .

### Моделирование процессов управления ЗС

Для подтверждения полученных результатов проведено моделирование разработанной системы управления ЗС. Моделирование спуска и стабилизации ЗС выполнено на основе концепции замороженных коэффициентов. В соответствии с ней процесс управления разделен на участки с фиксированными наборами значений интервальных параметров звена «трос – ЗС». Они приведены в таблице. График возмущающего воздействия представлен на рис. 2, а, управляющего воздействия – на рис. 2, б. Результаты моделирования режима спуска ЗС и его стабилизации с синтезированным ПИ-регулятором показаны на рис. 2, в и г. Из анализа графиков видно, что при спуске ЗС на глубину 6000 м среднее квадратичное значение отклонения скорости ЗС от скорости СЛ в режиме ее спуска составляет 0,025 м/с, а в режиме стабилизации – 0,015 м/с.

Значения параметров звена «трос – ЗС» в зависимости от глубины погружения

Параметры	Участки					
	1	2	3	4	5	6
$L_T^H$ , м	10	750	2250	3750	5250	6000
$C_{удГ}$ , Н	$3,5 \times 10^7$	$3,34 \times 10^7$	$3,18 \times 10^7$	$3,02 \times 10^7$	$2,86 \times 10^7$	$2,7 \times 10^7$
$C_T$ , Н/м	$3,5 \times 10^6$	$4,45 \times 10^4$	$1,41 \times 10^4$	$8,05 \times 10^3$	$5,44 \times 10^3$	$4,5 \times 10^3$
$\chi_{удГ}$ , Нс	$5,4 \times 10^4$	$5,1 \times 10^4$	$4,8 \times 10^4$	$4,5 \times 10^4$	$4,2 \times 10^4$	$3,9 \times 10^4$
$m_T$ , кг	16	$1,2 \times 10^3$	$3,6 \times 10^3$	$6 \times 10^3$	$8,4 \times 10^3$	$9,6 \times 10^3$
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$1 \times 10^3$	$1,03 \times 10^3$			$1,07 \times 10^3$	
$m_{3C}^*$ , кг	$4,47 \times 10^3$	$4,65 \times 10^3$			$4,81 \times 10^3$	

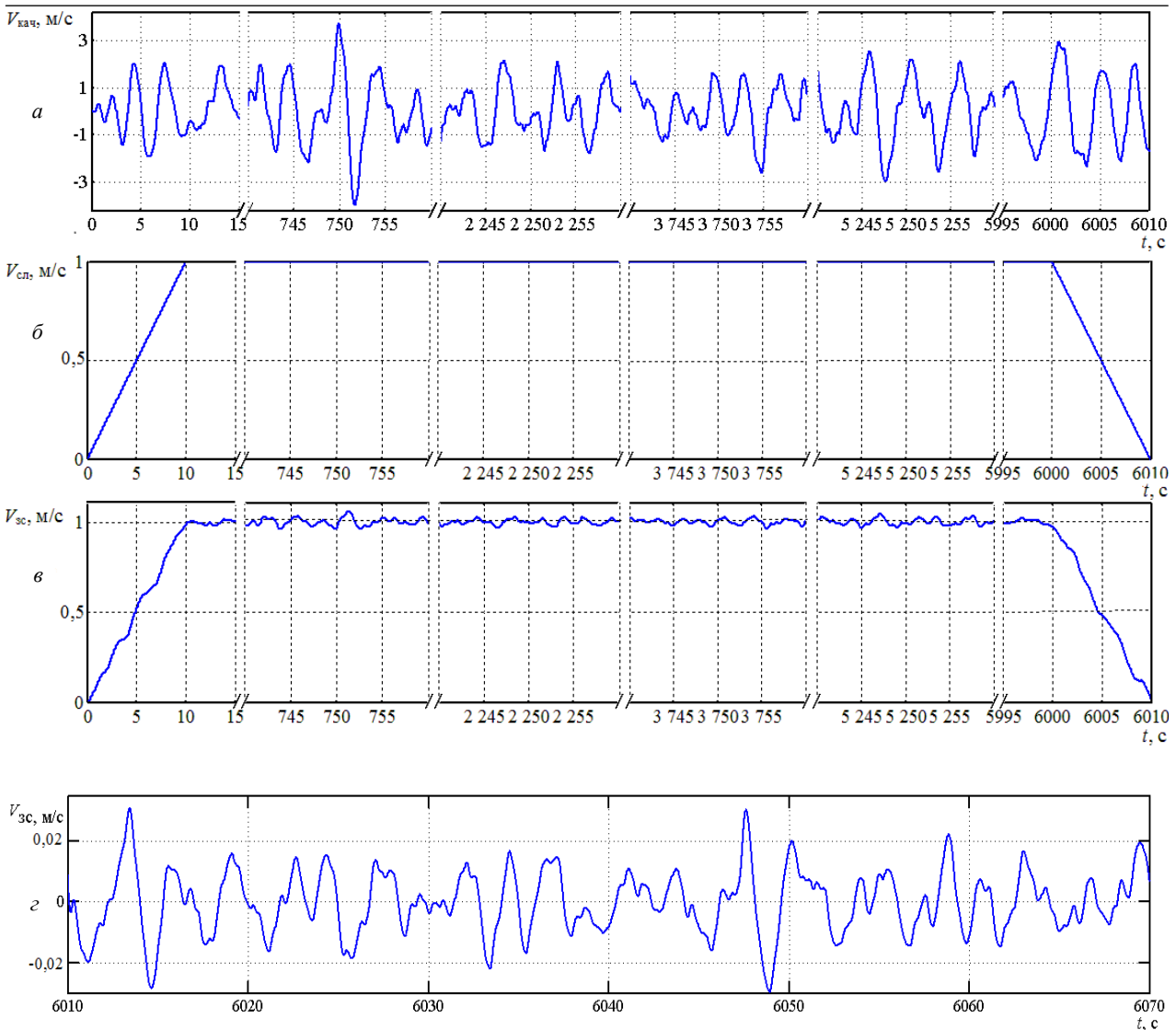


Рис. 2. Графики изменения: скорости морской качки – *a*; скорости судовой лебедки – *б*; скорости спускаемой ЗС – *в*; скорости ЗС при стабилизации – *г*

### Заключение

Разработана интервальная математическая модель и получены передаточные функции по управлению и возмущению системы управления для погружения ЗС на большие глубины и ее стабилизации. При этом компенсация морской качки проводится по сигналу отклонения скорости ЗС от скорости СЛ. В модели кабель-трос рассматривается с учетом распределенности его массы и трения о воду. Для проверки работоспособности спроектированной системы проведено ее моделирование в пакете MATLAB. Учитывая, что модель системы содержит интервально-неопределенные параметры, для моделирования применялся метод замороженных коэффициентов. Моделирование показало, что предложенная структура системы управления и рассчитанные настройки робастного ПИ-регулятора позволяют решить задачу демпфирования колебаний ЗС в условиях действия морской качки и проявления характерных особенностей системы.

### Литература

1. Nam B.W. Effects of Passive and Active Heave Compensators on Deepwater Lifting Operation / B.W. Nam, S.Y. Hong, Y.S. Kim // International Journal of Offshore and Polar Engineering. – 2013. – Vol. 23, № 1. – PP. 33–37.
2. Rowe S. Deepwater installation of subsea hardware / S. Rowe, B. Mackenzie, R. Snell // Proceedings of the 10th Offshore Symposium, Houston, TX. – 2001. – PP. 1–9.
3. A Heave Compensation Approach for Offshore Cranes / J. Neupert, T. Mahl, B. Haessig, O. Sawodny, K. Schneider // American Control Conference. – Seattle, Washington, USA. – 2008. – PP. 538–543.
4. Езангина Т.А. Управление спускаемым подводным аппаратом в условиях морского волнения / Т.А. Езангина, С.А. Гайворонский // Проблемы управления. – 2014. – №. 6. – С. 9–14.
5. Кувшинов Г.Е. Влияние морского ветрового волнения на глубоководный привязной объект / Г.Е. Кувшинов, Л.А. Наумов, К.В. Чупина. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 215 с.

6. Езангина Т.А. Анализ и синтез систем двухрежимного робастного управления привязными спускаемыми подводными объектами: дис. ... канд. техн. наук. – Хабаровск: Тихоокеанский гос. ун-т, 2016. – 193 с.

7. Бейнарлович В.А. Представление длинных упругих канатов в системах автоматического регулирования / В.А. Бейнарлович и др. // Изв. Том. политехн. ин-та. – Изд-во Том. ун-та, 1975. – Т. 285: Автоматизация промышленных установок. – С. 100–104.

8. Риман И.С. Присоединенные массы тел различной формы / И.С. Риман, Р.Л. Крепс // Труды ЦАГИ. – М., 1947. – Вып. 635. – 47 с.

---

**Езангина Татьяна Александровна**

Инженер каф. автоматике и компьютерных систем (АиКС) Национального исследовательского Томского политехнического университета  
Тел.: +7 (382-2) 70-17-77, доп. 52-78  
Эл. почта: eza-tanya@yandex.ru

**Гайворонский Сергей Анатольевич**

Канд. техн. наук, доцент каф. АиКС  
Тел.: +7 (382-2) 70-17-77, доп. 11-18  
Эл. почта: saga@tpu.ru

**Хожяев Иван Валерьевич**

Аспирант каф. АиКС  
Тел.: +7 (382-2) 70-17-77, доп. 52-78  
Эл. почта: ivh1@tpu.ru

Ezangina T.A., Khozhaev I.V., Gayvoronkiy S.A.

**Charging station control system for an underwater robot**

The article describes the systems to damp vertical oscillations of a charging station at great depths caused by sea disturbance using a shock-absorbing hoist located on the control station. The obtained mathematical model of the control system for a charging station takes into consideration the features of a control object. The latter includes the change of a cable-rope, its mass distribution by a considerable length, interval uncertainty of cable-rope features, mass of the charging station, associated water mass, change of water density and presence of friction of a cable-rope on water.

**Keywords:** charging station, interval uncertainty, distribution of a parameters, mathematical model, associated water mass friction, disturbance.