

Выбор типов растворов электролитов обусловлен совместимостью растворов по показателям барических коэффициентов, как показано на рисунке 2.

Выводы

Применение в системах охлаждения судовых силовых установок растворов электролитов вытекает из получения определённых свойств теплоносителей для различных типов ДВС. Выбор электролитов вместо этиленгликолей позволяет достигать лучших показателей взаимодействия с ингибиторами коррозии, в случае деградации свойств последних достаточно парциальных добавок в систему охлаждения. Учитывая экологические требования к эксплуатации ДВС этот способ улучшения свойств теплоносителей видится более предпочтительным и менее затратным.

Литература

1. Косолап Ю.Г. Теплопроводность смешанных растворов электролитов: дис...канд. техн. наук.- Баку, 1990.- 194 с.
2. Сафронов Г.А. Теплопроводность водных растворов электролитов: дис...канд. техн. наук.- Баку, 1985.- 220 с.
3. Абдулаев К.М., Эльдаров. В.С. Расчет теплопроводности двухкомпонентных растворов солей. //Изв. вузов: Нефть и газ. -1985. - №10.- С. 57-60
4. Литвиненко И.В. Теплопроводность водных растворов электролитов и ее связь со структурой воды: автореф. дисс...канд. техн. Наук.- Днепрпетровск, 1968.- 20 с.

5. Michels A. Sengers I. V. and Van der Culir P.S, The Thermal Conductivity of carbon dioxide in the critical Region // Physica, 1962, №3, P. 1201-12015.
6. Васильев В.П. Термодинамические свойства раствора электролита.- М.: Высшая школа, 1982.- 320 с.
7. Григорьев Е. Б.: диссертация ... доктора технических наук: 05.14.05,01.04.14.- Казань, 2008.
8. Филиппов Л.П. Исследование теплопроводности жидкостей. -М.: Изд-во МГУ, 1970.- 239 с.

References

1. Kosolap.YU.G. Teploprovodnost' smeshannyh rastvorov elektrolitov. Dis...kand. tekhn.nauk.- Baku,1990.- 194s.
2. Safronov.G.A. Teploprovodnost' vodnyh rastvorov elektrolitov. Dis...kand. tekhn.nauk.- Baku,1985.- 220s.
3. Abdulaev.K.M. El'darov. V.S. Raschet teploprovodnosti dvuhkomponent-nyh rastvorov solej. //Izv.vuzov: Neft' i gaz. -1985.-№10.-s. 57-60
4. Litvinenko.I.V. Teploprovodnost' vodnyh rastvorov elektrolitov i ee svyaz' so strukturoj vody Avtoref.diss...kand.tekhn.nauk- Dnepropetrovsk,1968.-20s.
5. Michels A. Sengers I. V. and Van der Culir P.S, The Thermal Conductivity of carbon dioxide in the critical Region // Physica, 1962, №3, R. 1201-12015.
6. Vasil'ev V.P. Termodinamicheskie svoystva rastvora elektrolita.-M.: Vysshaya skola,1982.-320s.
7. Grigor'ev, Evgenij Borisovich dissertaciya ... doktora tekhnicheskikh nauk: 05.14.05,01.04.14 Kazan'2008.
8. Filippov L.P. Issledovanie teploprovodnosti zhidkostej. -M.: Izd-vo MGU, 1970.-239s.

УДК 629.584

DOI: 10.34046/aumsuomt105/30

КОРРЕКТИРОВКА ПО ИНВАРИАНТАМ КОМАНД УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖИТЕЛЯМИ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

И.М. Данцевич, кандидат технических наук, доцент

В статье предлагается разработка методов компенсации перекосов возникающих при задании следующих типов движения вперед-назад, разворот влево-вправо, поворот налево-направо и их комбинации. Некомпенсированные упоры приводят к неконтролируемым разворотам телеуправляемых аппаратов при задании любого из типов управления. Управляемость подводных телеуправляемых аппаратов связана с ограниченностью поля зрения фототелевизионного комплекса в условиях искусственного освещения и ограниченной дальностью наблюдения, обычно 5-7 метров.

Разработанная методика может использоваться для различных телеуправляемых и автономных подвижных объектах, силовая установка которых построена на много движительной основе.

Ключевые слова: математическая модель, матрица преобразования командных сигналов, телеуправляемые необитаемые подводные комплексы (ТНПК), комбинированное управление многодвигательным комплексом, команды управления двигателями, коэффициенты передачи, упоры винтов.

ADJUSTMENT ACCORDING TO INVARIANTS OF THE PROPULSION CONTROL COMMANDS OF A REMOTE-CONTROLLED UNMANNED UNDERWATER VEHICLE

I.M. Dantsevich

The article proposes the development of methods for compensating for distortions occurring when specifying the following types of forward-backward movement, swinging port-starboard, turning to port-starboard and their combinations.

Uncompensated stops lead to uncontrolled turns of remote-controlled devices when setting any of the types of control. The controllability of underwater remote-controlled vehicles is associated with the limited field of view of the photo-television complex in conditions of artificial lighting and a limited observation range, usually 5-7 meters.

The developed technology can be used for various remote-controlled and autonomous mobile objects, the power plant of which is built on a multi-propulsion basis.

Keywords: mathematical model, command signal conversion matrix, Remotely Operated Vehicle (ROV), combined control of multi-engine complex, combined control of multi-engine complex, engine control commands, transmission factors, transmission ratios, screw stops.

Введение

Перемещение ТНПА при исследовании конструкции объекта должно осуществляться маневрированием аппарата на некотором достаточно близком расстоянии к объекту.

Контроллер управления движением ТНПА выполняет линейные преобразования векторов управления (или их комбинации) U_m и выдачу на каждый из 4-х движителей [1-2; 5], как показано на рисунке 1:

$$N^* = AU, \quad (1)$$

где $N^* = (n_i^*)_{4 \times 1}$ – матрица преобразования сигналов управления; $A = (a_{ij})_{4 \times 3}$ – оператор преобразования (матрица коэффициентов).

Задание сигналов управления при полуавтоматическом управлении (с джойстика) или заданный программой интеллектуального управления тип движения обеспечивается комбинацией сигналов u_1 – упоры движителей «вперёд-назад» [3], u_2 – переключение полярности сигналов, обеспечивающих повороты «налево-направо», u_3 – переключение полярности сигналов, реализующих сдвиг «влево-вправо» [4-6; 7]:

$$n_i^* = \sum_{j=1}^3 a_{ij} u_j, \quad (i \in 1,4). \quad (2)$$

Управление перемещением аппарата в вертикальной плоскости реализуется другой группой движителей (обычно включает до 4-х движителей) и в статье не рассматриваются [6].

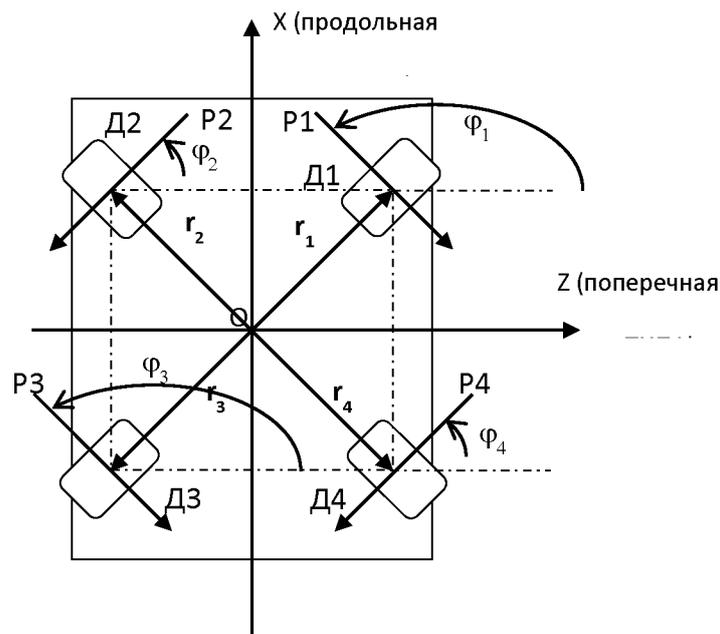


Рисунок 1 – Схема установки движителей ТНПА

Выражения (1-2) элементов матрицы преобразования A получены при условии, что все параметры, характеризующие тяговые характеристики носителя ТНПА, имеют строго номинальные значения. В реальных условиях те или иные

параметры тяговых характеристик (углы установки движителей, координаты приложения векторов сил тяг, характер зависимости силы тяги каждого движителя от управляющих сигналов различной полярности, положение центра масс

ТНПА в системе координат, связанной с носителем ТНПА, и т.п.) могут отличаться от номинальных значений [8-10].

В связи с этим возникает задача коррекции номинальных значений коэффициентов, вычисленных по формулам (1-2). Допустим, что каждый элемент матрицы А может корректироваться дополнительным коэффициентом:

$$a_{ij} = (a_{ij})_0 + \Delta a_{ij}, \quad (i \in 1,4, \quad j \in 1,3), \quad (3)$$

где $(a_{ij})_0$ - номинальное значение коэффициента a_{ij} , Δa_{ij} - корректирующее значение коэффициента a_{ij} .

1. Моделирование динамики корректирующих значений коэффициентов управления ТНПА

Для определения выражения корректирующих порций Δa_{ij} преобразуем формулы (1-2) к виду [11-13]:

$$\begin{aligned} a_{i1} &= (q_x)_0 + \Delta q_{ix}, \quad (i \in 1,4); \\ a_{12} &= -\frac{1}{2}((q_y)_0 + \Delta q_{1y}) \left[1 + \frac{(q_y^*)_0}{(q_y)_0} + \left(1 - \frac{(q_y^*)_0}{(q_y)_0} \right) \text{sign}(u_2) \right]; \\ a_{42} &= -\frac{1}{2}((q_y)_0 + \Delta q_{4y}) \left[1 + \frac{(q_y^*)_0}{(q_y)_0} + \left(1 - \frac{(q_y^*)_0}{(q_y)_0} \right) \text{sign}(u_2) \right]; \\ a_{22} &= \frac{1}{2}((q_y)_0 + \Delta q_{2y}) \left[1 + \frac{(q_y^*)_0}{(q_y)_0} - \left(1 - \frac{(q_y^*)_0}{(q_y)_0} \right) \text{sign}(u_2) \right]; \\ a_{32} &= \frac{1}{2}((q_y)_0 + \Delta q_{3y}) \left[1 + \frac{(q_y^*)_0}{(q_y)_0} - \left(1 - \frac{(q_y^*)_0}{(q_y)_0} \right) \text{sign}(u_2) \right]; \\ a_{13} &= -\frac{1}{2}((q_z)_0 + \Delta q_{1z}) \left[1 + \frac{(q_z^*)_0}{(q_z)_0} + \left(1 - \frac{(q_z^*)_0}{(q_z)_0} \right) \text{sign}(u_3) \right]; \\ a_{33} &= -\frac{1}{2}((q_z)_0 + \Delta q_{3z}) \left[1 + \frac{(q_z^*)_0}{(q_z)_0} + \left(1 - \frac{(q_z^*)_0}{(q_z)_0} \right) \text{sign}(u_3) \right]; \\ a_{23} &= \frac{1}{2}((q_z)_0 + \Delta q_{2z}) \left[1 + \frac{(q_z^*)_0}{(q_z)_0} - \left(1 - \frac{(q_z^*)_0}{(q_z)_0} \right) \text{sign}(u_3) \right]; \\ a_{43} &= \frac{1}{2}((q_z)_0 + \Delta q_{4z}) \left[1 + \frac{(q_z^*)_0}{(q_z)_0} - \left(1 - \frac{(q_z^*)_0}{(q_z)_0} \right) \text{sign}(u_3) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

где: $(q_x)_0 = (q_y)_0 = (q_z)_0 = \frac{nm}{u_m}$,
 $(q_y^*)_0 = (q_z^*)_0 = (q_z)_0 = \frac{nm}{u_m} \cdot \frac{P_{min}}{P_{max}}$, (5)

$$\begin{aligned} \frac{(q_y^*)_0}{(q_y)_0} &= \frac{(q_z^*)_0}{(q_z)_0} = \frac{P_{min}}{P_{max}}; \\ \text{sign}(u_j) &= \begin{cases} 1, & \text{если } u_j \geq 0, \\ -1, & \text{если } u_j < 0, \\ & j = 2,3; \end{cases} \end{aligned}$$

где: $\Delta q_{ix}, \Delta q_{iy}, \Delta q_{iz}, (i \in 1,4)$ – корректирующие коэффициенты, n_m – число дискретных уровней управления, u_m – задающий параметр управления, P_{min} – минимальное значение силы упора движителей, P_{max} – максимальное значение силы упора движителей [14].

Из выражений (4) получим:

$$\begin{aligned} \Delta a_{i1} &= \Delta q_{ix}, \quad (i \in 1,4); \\ \Delta a_{12} &= -\frac{1}{2} \Delta q_{1y} \left[1 + \frac{(q_y^*)_0}{(q_y)_0} + \left(1 - \frac{(q_y^*)_0}{(q_y)_0} \right) \text{sign}(u_2) \right]; \\ \Delta a_{42} &= -\frac{1}{2} \Delta q_{4y} \left[1 + \frac{(q_y^*)_0}{(q_y)_0} + \left(1 - \frac{(q_y^*)_0}{(q_y)_0} \right) \text{sign}(u_2) \right]; \\ \Delta a_{22} &= \frac{1}{2} \Delta q_{2y} \left[1 + \frac{(q_y^*)_0}{(q_y)_0} - \left(1 - \frac{(q_y^*)_0}{(q_y)_0} \right) \text{sign}(u_2) \right]; \\ \Delta a_{32} &= \frac{1}{2} \Delta q_{3y} \left[1 + \frac{(q_y^*)_0}{(q_y)_0} - \left(1 - \frac{(q_y^*)_0}{(q_y)_0} \right) \text{sign}(u_2) \right]; \\ \Delta a_{13} &= -\frac{1}{2} \Delta q_{1z} \left[1 + \frac{(q_z^*)_0}{(q_z)_0} + \left(1 - \frac{(q_z^*)_0}{(q_z)_0} \right) \text{sign}(u_3) \right]; \\ \Delta a_{33} &= -\frac{1}{2} \Delta q_{3z} \left[1 + \frac{(q_z^*)_0}{(q_z)_0} + \left(1 - \frac{(q_z^*)_0}{(q_z)_0} \right) \text{sign}(u_3) \right]; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\Delta a_{23} = \frac{1}{2} \Delta q_{2z} \left[1 + \frac{(q_z^*)_0}{(q_z)_0} - \left(1 - \frac{(q_z^*)_0}{(q_z)_0} \right) \text{sign}(u_3) \right];$$

$$\Delta a_{43} = \frac{1}{2} \Delta q_{4z} \left[1 + \frac{(q_z^*)_0}{(q_z)_0} - \left(1 - \frac{(q_z^*)_0}{(q_z)_0} \right) \text{sign}(u_3) \right].$$

Из выражений (4) следует, что корректирующие коэффициенты Δa_{i2} , Δa_{i3} , ($i \in 1,4$) зависят от полярности сигналов u_2 и u_3 и имеют таким образом по два значения, но фактически искомыми величинами независимо от полярности командных сигналов будут 12 коэффициентов, а именно комбинации из элементов Δq_{ix} , Δq_{iy} , Δq_{iz} , ($i \in 1,4$).

Пусть значения параметров, от которых зависят тяговые характеристики $F = (P_x \ M_y \ P_z)^T$, отличаются от номинальных на величины, имеющие первый порядок малости:

$$\begin{aligned} x_{pi} &= (x_{pi})_0 + \Delta x_{pi}, \quad z_{pi} = (z_{pi})_0 + \Delta z_{pi}, \quad \phi_i = (\phi_i)_0 + \Delta \phi_i, \\ k_{pi} &= (k_p)_0 + \Delta k_{pi}, \quad k_{mi} = (k_m)_0 + \Delta k_{mi}, \quad (i \in 1,4). \end{aligned} \quad (7)$$

Найдём зависимости тяговых характеристик $F = (P_x \ M_y \ P_z)^T$ от управляющих сигналов u_j , $j \in 1,3$ при раздельном управлении. В этом случае функции n_i , $i \in 1,4$ будут меняться в линейном диапазоне от $-n_m$ до $+n_m$.

Допустим, что при этом n_i , $i \in 1,4$ будут непрерывными функциями своих аргументов u_j , $j \in 1,3$ в соответствии с формулой:

$$n_i = n_i^* = \sum_{j=1}^3 a_{ij} u_j, \quad (i \in 1,4). \quad (8)$$

Подставим условия (7) в уравнение (8).

$$n_i = \sum_{j=1}^3 \left[(a_{ij})_0 + \Delta a_{ij} \right] u_j = (n_i)_0 + \Delta n_i, \quad (i \in 1,4),$$

$$\text{где: } (n_i)_0 = \sum_{j=1}^3 (a_{ij})_0 u_j, \quad \Delta n_i = \sum_{j=1}^3 \Delta a_{ij} u_j, \quad (i \in 1,4). \quad (9)$$

Силы тяги можно определить по формулам:

$$\begin{aligned} P_i &= \frac{1}{2} [k_p + k_m + (k_p - k_m) \text{sign}((n_i)_0)] n_i = (P_i)_0 + \Delta P_i, \\ (P_i)_0 &= \frac{1}{2} [(k_p)_0 + (k_m)_0 + ((k_p)_0 - (k_m)_0) \text{sign}((n_i)_0)] (n_i)_0, \\ \Delta P_i &= \frac{1}{2} [\Delta k_{pi} + \Delta k_{mi} + (\Delta k_{pi} - \Delta k_{mi}) \text{sign}((n_i)_0)] (n_i)_0 + \\ &+ \frac{1}{2} [(k_p)_0 + (k_m)_0 + ((k_p)_0 - (k_m)_0) \text{sign}((n_i)_0)] \Delta n_i, \quad (i \in 1,4). \end{aligned} \quad (10)$$

2. Управление движителями по инвариантам цифровых двойников

Рассмотрим вариант управление движением вперёд-назад, в этом случае $u_1 \neq 0$, $u_2 = u_3 = 0$.

При положительном сигнале u_1 силы тяги всех движителей направлены вперёд:

$$\begin{aligned} (n_i)_0 &= (q_x)_0 u_1 > 0, \quad \Delta n_i = \Delta q_{ix} u_1, \\ P_i &= [(k_p)_0 + \Delta k_p] [(q_x)_0 + \Delta q_{ix}] u_1 = (P_i)_0 + \Delta P_i, \\ (P_i)_0 &= (k_p)_0 (q_x)_0 u_1 > 0, \\ \Delta P_i &= \Delta k_p (q_x)_0 u_1 + (k_p)_0 \Delta q_{ix} u_1, \quad i \in 1,4. \end{aligned} \quad (11)$$

Запишем выражения для перекрёстных тяговых усилий M_y , P_z :

$$\begin{aligned} M_y &= \sum_{i=1}^4 P_i (z_{pi} \sin(\phi_i) - x_{pi} \cos(\phi_i)) = (M_y)_0 + \Delta M_y, \\ P_z &= \sum_{i=1}^4 P_i \cos(\phi_i) = (P_z)_0 + \Delta P_z. \end{aligned} \quad (12)$$

В формулах (12) момент $(M_y)_0$ и сила $(P_z)_0$ равны нулю, так как они определены при номинальных значениях параметров, что соответствует движению в продольной оси.

Вариации ΔM_y , ΔP_z запишутся в виде:

$$\Delta M_y = \Delta M_y^B(u_1^+) + \Delta M_y^K, \quad \Delta P_z = \Delta P_z^B(u_1^+) + \Delta P_z^K, \quad (13)$$

где $\Delta M_y^B(u_1^+)$, $\Delta P_z^B(u_1^+)$ - вариации перекрёстных управляющих воздействий, вызванные возмущающими факторами, при $u_1 > 0$; ΔM_y^K , ΔP_z^K - корректирующие вариации перекрёстных управляющих воздействий, необходимые для компенсации возмущений.

Для наборов сигналов управления $\Delta M_y^B(u_1^+)$, $\Delta P_z^B(u_1^+)$, ΔM_y^K , ΔP_z^K получим выражения:

$$\Delta M_y^B(u_1^+) = \sum_{i=1}^4 \{ (P_i)_0 [\Delta z_{pi} \sin((\phi_i)_0) - \Delta x_{pi} \cos((\phi_i)_0)] +$$

$$\begin{aligned}
 &+((z_{pi})_0 \cos((\phi_i)_0) + (x_{pi})_0 \sin((\phi_i)_0))\Delta\phi_i] + \\
 &+[(z_{pi})_0 \sin((\phi_i)_0) - (x_{pi})_0 \cos((\phi_i)_0)](q_x)_0\Delta k_p u_1\}; \\
 \Delta P_z^B(u_1^+) &= \sum_{i=1}^4 [\cos((\phi_i)_0) (q_x)_0\Delta k_p u_1 - (P_i)_0 \sin((\phi_i)_0) \Delta\phi_i]; \tag{14}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta M_y^K &= \sum_{i=1}^4 [(z_{pi})_0 \sin((\phi_i)_0) - (x_{pi})_0 \cos((\phi_i)_0)](k_p)_0\Delta q_{ix} u_1; \\
 \Delta P_z^K &= \sum_{i=1}^4 \cos((\phi_i)_0) (k_p)_0\Delta q_{ix} u_1. \tag{15}
 \end{aligned}$$

С учётом номинальных (откалиброванных в опытовом бассейне) значений:

$$\begin{aligned}
 (x_{p1})_0 &= (x_{p2})_0 = a, (x_{p3})_0 = (x_{p4})_0 = -a; \\
 (z_{p1})_0 &= (z_{p4})_0 = b, (z_{p2})_0 = (z_{p3})_0 = -b; \\
 \sin((\phi_i)_0) &= \sqrt{2}/2, i \in 1,4; \\
 \cos((\phi_1)_0) &= \cos((\phi_3)_0) = -\sqrt{2}/2, \cos((\phi_2)_0) = \cos((\phi_4)_0) = \sqrt{2}/2; \\
 (k_p)_0 &= P_{max} / n_m(k_m)_0 P_{min} / n_m \tag{16}
 \end{aligned}$$

выражения (16) примут вид:

$$\begin{aligned}
 \Delta M_y^K &= \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{P_{max}}{n_m(a+b)(\Delta q_{1x} - \Delta q_{2x} - \Delta q_{3x} + \Delta q_{4x})u_1}; \\
 \Delta P_z^K &= \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{P_{max}}{n_m(-\Delta q_{1x} + \Delta q_{2x} - \Delta q_{3x} + \Delta q_{4x})u_1}. \tag{17}
 \end{aligned}$$

Введём новые переменные, замену разностям:

$$\mu_{12} = \Delta q_{1x} - \Delta q_{2x}, \mu_{34} = \Delta q_{3x} - \Delta q_{4x}. \tag{18}$$

Подставляя новые переменные (17) в (18), получим:

$$\Delta M_y^K = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{P_{max}}{n_m(a+b)(\mu_{12} - \mu_{34})u_1}; \Delta P_z^K = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{P_{max}}{n_m(-\mu_{12} - \mu_{34})u_1}. \tag{19}$$

Рассмотрим балансировочный режим, при котором выражения (19) равны нулю:

$$\Delta M_y^B(u_1^+) + \Delta M_y^K = 0, \Delta P_z^B(u_1^+) + \Delta P_z^K = 0. \tag{20}$$

С учётом сделанных допущений уравнения (18) запишутся так:

$$\begin{aligned}
 \mu_{12} - \mu_{34} &= -\sqrt{2} \frac{n_m}{(a+b) u_1 P_{max}} \Delta M_y^B(u_1^+); \\
 \mu_{12} + \mu_{34} &= \sqrt{2} n_m \frac{\Delta P_z^B(u_1^+)}{u_1 P_{max}}. \tag{21}
 \end{aligned}$$

При отрицательном сигнале u_1 силы тяги всех движителей направлены назад:

$$\begin{aligned}
 (n_i)_0 &= (q_x)_0 u_1 < 0, \Delta n_i = \Delta q_{ix} u_1, \\
 P_i &= [(k_m)_0 + \Delta k_m][(q_x)_0 + \Delta q_{ix}] u_1 = (P_i)_0 + \Delta P_i, \\
 (P_i)_0 &= (k_m)_0 (q_x)_0 u_1 < 0, \\
 \Delta P_i &= \Delta k_m (q_x)_0 u_1 + (k_m)_0 \Delta q_{ix} u_1, \quad i \in 1,4. \tag{22}
 \end{aligned}$$

Вариации перекрёстных управляющих воздействий, вызванные возмущающими факторами при $u_1 < 0$, обозначим $\Delta M_y^B(u_1^-)$, $\Delta P_z^B(u_1^-)$.

Для вариаций $\Delta M_y^B(u_1^-)$, $\Delta P_z^B(u_1^-)$, ΔM_y^K , ΔP_z^K получим выражения:

$$\begin{aligned}
 \Delta M_y^B(u_1^-) &= \sum_{i=1}^4 \{(P_i)_0 [\Delta z_{pi} \sin((\phi_i)_0) - \Delta x_{pi} \cos((\phi_i)_0)] + \\
 &+ ((z_{pi})_0 \cos((\phi_i)_0) + (x_{pi})_0 \sin((\phi_i)_0))\Delta\phi_i\} + \\
 &+ [(z_{pi})_0 \sin((\phi_i)_0) - (x_{pi})_0 \cos((\phi_i)_0)](q_x)_0\Delta k_m u_1\}; \\
 \Delta P_z^B(u_1^-) &= \sum_{i=1}^4 [\cos((\phi_i)_0) (q_x)_0\Delta k_m u_1 - (P_i)_0 \sin((\phi_i)_0) \Delta\phi_i]; \tag{23}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta M_y^K &= \sum_{i=1}^4 [(z_{pi})_0 \sin((\phi_i)_0) - (x_{pi})_0 \cos((\phi_i)_0)](k_m)_0\Delta q_{ix} u_1; \\
 \Delta P_z^K &= \sum_{i=1}^4 \cos((\phi_i)_0) (k_m)_0\Delta q_{ix} u_1. \tag{24}
 \end{aligned}$$

С учётом сделанных допущений (19) выражения (24) примут вид:

$$\begin{aligned}
 \Delta M_y^K &= \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{P_{min}}{n_m(a+b)(\Delta q_{1x} - \Delta q_{2x} - \Delta q_{3x} + \Delta q_{4x})_1}; \\
 \Delta P_z^K &= \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{P_{min}}{n_m(-\Delta q_{1x} + \Delta q_{2x} - \Delta q_{3x} + \Delta q_{4x})_1}. \tag{25}
 \end{aligned}$$

Подставим в (25) форму (19):

$$\begin{aligned}
 \Delta M_y^K &= \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{P_{min}}{n_m(a+b)(\mu_{12} - \mu_{34})_1}; \\
 \Delta P_z^K &= \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{P_{min}}{n_m(-\mu_{12} - \mu_{34})_1}. \tag{25}
 \end{aligned}$$

Следующим шагом примем равными нулю перекрёстные составляющие сил и моментов, возникающие вследствие ошибок описанными уравнением (12):

$$\Delta M_y^B(u_1^-) + \Delta M_y^K = 0, \quad \Delta P_z^B(u_1^-) + \Delta P_z^K = 0. \quad (26)$$

Подставим в уравнения (26) выражения (25) для перекрёстных корректирующих управляющих воздействий и преобразуем их к виду:

$$\begin{aligned} \mu_{12} - \mu_{34} &= -\sqrt{2} \frac{n_m}{(a+b)} \frac{\Delta M_y^B(u_1^-)}{u_1 P_{min}}; \\ \mu_{12} + \mu_{34} &= \sqrt{2} n_m \frac{\Delta P_z^B(u_1^-)}{u_1 P_{min}}. \end{aligned} \quad (27)$$

Сравним уравнения (20) и (27). Отношения $\frac{\Delta M_y^B(u_1^+)}{u_1}$, $\frac{\Delta P_z^B(u_1^+)}{u_1}$ для серии замеров величин $\Delta M_y^B(u_{1j}^+)$, $\Delta P_z^B(u_{1j}^+)$, $j \in 1, N$ при различных значениях u_{1j} , $j \in 1, N$ можно определить как крутизну соответствующих экспериментальных характеристик $\Delta M_y^B(u_1^+) = f_{1p}(u_1)$, $\Delta P_z^B(u_1^+) = f_{2p}(u_1)$, аппроксимированных уравнениями сплайнами:

$$\Delta M_y^B(u_1^+) = \alpha_p + M_y^{u_1^+} u_1, \quad \Delta P_z^B(u_1^+) = \beta_p + P_z^{u_1^+} u_1. \quad (28)$$

Коэффициенты уравнений (28) можно определить по результатам стендовых испытаний методом наименьших квадратов (делая допущение, что коэффициенты α_p и β_p должны быть близки к нулю). Тогда при расчёте поправок μ_{12} , μ_{34} в уравнения (20) вместо отношений $\frac{\Delta M_y^B(u_1^+)}{u_1}$, $\frac{\Delta P_z^B(u_1^+)}{u_1}$ следует подставить $\frac{\Delta M_y^B(u_1^+)}{u_1} \approx M_y^{u_1^+}$, $\frac{\Delta P_z^B(u_1^+)}{u_1} \approx P_z^{u_1^+}$.

Также как и при $u_1 < 0$, придём к выводу, что $\frac{\Delta M_y^B(u_1^-)}{u_1} \approx M_y^{u_1^-}$, $\frac{\Delta P_z^B(u_1^-)}{u_1} \approx P_z^{u_1^-}$, где $M_y^{u_1^-}$, $P_z^{u_1^-}$ - коэффициенты линейных уравнений:

$$\Delta M_y^B(u_1^-) = \alpha_m + M_y^{u_1^-} u_1, \quad \Delta P_z^B(u_1^-) = \beta_m + P_z^{u_1^-} u_1, \quad (29)$$

аппроксимирующих экспериментальные характеристики $\Delta M_y^B(u_1^-) = f_{1m}(u_1)$, $\Delta P_z^B(u_1^-) = f_{2m}(u_1)$.

Следует ожидать, что отношения $\frac{M_y^{u_1^+}}{P_{max}}$, $\frac{P_z^{u_1^+}}{P_{max}}$ будут близки отношениям $\frac{M_y^{u_1^-}}{P_{min}}$, $\frac{P_z^{u_1^-}}{P_{min}}$, так как при положительном сигнале u_1 на единицу изменения сигнала приходится большее изменение силы тяги каждого движителя, чем при отрицательном в силу нелинейности тяговых характеристик движителей, что должно привести к соответствующей не симметрии характеристик $\Delta M_y^B(u_1) = f_1(u_1)$, $\Delta P_z^B(u_1) = f_2(u_1)$ при различных полярностях сигнала u_1 . Причём, можно ожидать, что коэффициенты наклона аппроксимирующих линейных зависимостей (28) и (29) относятся друг к другу так же, как коэффициенты наклона тяговых характеристик:

$$k_p = \frac{P_{max}}{n_m}, \quad k_m = \frac{P_{min}}{n_m}, \quad \text{sign}(n_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } n_i \geq 0, \\ -1, & \text{если } n_i < 0. \end{cases} \quad (30)$$

$$\frac{M_y^+}{M_y^-} \approx \frac{P_z^+}{P_z^-} \approx \frac{k_p}{k_m} = \frac{P_{max}}{P_{min}}. \quad (31)$$

Введём обозначения осреднённых оценок математических ожиданий отношений $\frac{M_y^{u_1^+}}{P_{max}}$, $\frac{P_z^{u_1^+}}{P_{max}}$, $\frac{M_y^{u_1^-}}{P_{min}}$, $\frac{P_z^{u_1^-}}{P_{min}}$:

$$\begin{aligned} h_y^{u_1} &= \frac{1}{2} \cdot \left[M \left\{ \frac{M_y^{u_1^+}}{P_{max}} \right\} + M \left\{ \frac{M_y^{u_1^-}}{P_{min}} \right\} \right]; \\ h_z^{u_1} &= \frac{1}{2} \cdot \left[M \left\{ \frac{P_z^{u_1^+}}{P_{max}} \right\} + M \left\{ \frac{P_z^{u_1^-}}{P_{min}} \right\} \right]. \end{aligned} \quad (32)$$

С учётом обозначений (32) уравнения (21) и (27) запишем:

$$\begin{aligned} \mu_{12} - \mu_{34} &= -\sqrt{2} \frac{n_m}{(a+b)} h_y^{u_1}; \\ \mu_{12} + \mu_{34} &= \sqrt{2} n_m h_z^{u_1}. \end{aligned} \quad (33)$$

Решение уравнений (33):

$$\mu_{12} = \frac{\sqrt{2}}{2} n_m \left(h_z^{u_1} - \frac{h_y^{u_1}}{(a+b)} \right); \quad \mu_{34} = \frac{\sqrt{2}}{2} n_m \left(h_z^{u_1} + \frac{h_y^{u_1}}{(a+b)} \right). \quad (34)$$

Подставив (33) в выражения (18), найдём поправочные коэффициенты Δq_{1x} , Δq_{2x} , Δq_{3x} , Δq_{4x} из условия, что сумма квадратов их значений будет минимальной. В итоге получим:

$$\Delta q_{1x} = \frac{1}{2} \mu_{12} = \frac{\sqrt{2}}{4} n_m \left(h_z^{u_1} - \frac{h_y^{u_1}}{(a+b)} \right);$$

$$\begin{aligned} \Delta q_{2x} &= -\frac{1}{2}\mu_{12} = -\frac{\sqrt{2}}{4}n_m \left(h_z^{u_1} - \frac{h_y^{u_1}}{(a+b)} \right); \\ \Delta q_{3x} &= \frac{1}{2}\mu_{34} = \frac{\sqrt{2}}{4}n_m \left(h_z^{u_1} + \frac{h_y^{u_1}}{(a+b)} \right); \\ \Delta q_{4x} &= -\frac{1}{2}\mu_{34} = -\frac{\sqrt{2}}{4}n_m \left(h_z^{u_1} + \frac{h_y^{u_1}}{(a+b)} \right). \end{aligned} \tag{35}$$

Оценим результаты работы проверочным расчётом, также возьмём вариант 1 (управление по сигналу U1).

На основании таблицы 1 (откалиброванные значения сигналов управления и упоров движителей, полученные в бассейне) линеаризуем методом наименьших квадратов характеристики $M_y(U_1)$, $P_z(U_1)$ при различных полярностях сигнала U1 в соответствии с формулами (31) и (32):

$$\begin{aligned} \Delta M_y^B(u_1^-) &= \alpha_m + M_y^{u_1^-} u_1, \quad \Delta P_z^B(u_1^-) = \beta_m + P_z^{u_1^-} u_1; \\ \Delta M_y^B(u_1^+) &= \alpha_p + M_y^{u_1^+} u_1, \quad \Delta P_z^B(u_1^+) = \beta_p + P_z^{u_1^+} u_1; \end{aligned} \tag{36}$$

где $\alpha_m = 0,0017$; $M_y^{u_1^-} = 1,2374$; $\beta_m = 0,00083$; $P_z^{u_1^-} = -1,0879$;

$$\alpha_p = -0,00083; M_y^{u_1^+} = 2,0871; \beta_p = -0,00083; P_z^{u_1^+} = -1,4379.$$

Таблица 1 – Значения сигналов управления и упоров движителей, полученные в бассейне (движителей Model 1020) с максимальным упором вперёд $P_{max} = 21,4$ кгс и максимальным упором назад $P_{min} = 14,5$ кгс;

U1 [В]	Px [Н]	My [Нм]	Pz [Н]	P1 [Н]	P2 [Н]	P3 [Н]	P4 [Н]
-14	-367.04	-17.32	15.23	-146.38	-116.74	-121.03	-129.61
-12	-314.6	-14.85	13.06	-116.98	-100.06	-103.74	-111.1
-10	-262.17	-12.37	10.88	-97.49	-83.39	-86.45	-92.58
-8	-209.73	-9.9	8.7	-77.99	-66.71	-69.16	-74.07
-6	-157.3	-7.42	6.53	-58.49	-50.03	-51.87	-55.55
-4	-104.87	-4.95	4.35	-38.99	-33.35	-34.58	-37.03
-2	-52.43	-2.47	2.18	-19.5	-16.68	-17.29	-18.52
0	0	0	0	0	0	0	0
2	77.27	4.17	-2.88	28.82	24.28	25.14	27.84
4	154.53	8.35	-5.75	57.63	48.56	50.28	55.67
6	231.8	12.52	-8.63	86.45	72.84	75.41	83.51
8	309.07	16.7	-11.5	115.27	97.12	100.55	111.34
10	386.33	20.87	-14.38	144.08	121.4	125.69	139.18
12	463.6	25.04	-17.26	172.9	145.68	150.83	167.02
14	540.86	28.22	-20.13	201.72	169.96	175.97	194.85

По формуле (32) найдём коэффициенты $h_y^{u_1}$, $h_z^{u_1}$:

$$h_y^{u_1} = 0,00932; h_z^{u_1} = -0,00725.$$

По формулам (35) получим значения корректирующих коэффициентов:

$$\Delta q_{1x} = -1,031; \Delta q_{2x} = 1,031; \Delta q_{3x} = 0,375; \Delta q_{4x} = -0,375.$$

Числовые значения функций $P_x(U_1)$, $M_y(U_1)$, $P_z(U_1)$ из таблицы 1 и таблицы 2 поместим в таблице

3. В последней строке таблицы, поименованной символом σ , вычислены стандартные отклонения для данных, приведённых в столбцах, относительно нуля.

Таблица 2 – Рассчитанные корректуры движительно-рулевого комплекса

количество уровней сигнала команды $n_m=12$ отклонения P_{max} от номинала в кгс							
dprmax1		dprmax2		dprmax3		dprmax4	
2.1		-1.6		-0.9		1.3	
отклонения P_{min} от номинала в кгс							
dprmin1		dprmin2		dprmin3		dprmin4	
1.4		-0.9		-0.4		0.6	
коэффициенты модели движителей							
kp1	kp2	kp3	kp4	km1	km2	km3	km4
1.801	1.517	1.571	1.74	1.219	1.042	1.081	1.157
координаты точек приложения сил тяги, м							
xp1	xp2	xp3	xp4	zp1	zp2	zp3	zp4
0.32	0.285	-0.27	-0.322	0.286	-0.321	-0.27	0.282
углы установки движителей, радиан							

количество уровней сигнала команды $n_m=12$ отклонения P_{max} от номинала в кгс							
\ddot{f}_1		\ddot{f}_2		\ddot{f}_3		\ddot{f}_4	
2.382		0.829		2.304		0.846	
Номинальные значения передаточных коэффициентов							
k_{p0}	k_{pm}	q_x	q_y	q_z	q_{ys}	q_{zs}	
1.64	1.111	8	8	8	5.421	5.421	
Корректирующие значения передаточных коэффициентов							
dq_{x1}		dq_{x2}		dq_{x3}		dq_{x4}	
-1.031		1.031		0.375		-0.375	
dq_{y1}		dq_{y2}		dq_{y3}		dq_{y4}	
0		0		0		0	
dq_{z1}		dq_{z2}		dq_{z3}		dq_{z4}	
0		0		0		0	
матрица корректур (коэффициентов) упоров движителей на направление движения							
Силы	упоры движителей						
	P_1	P_2	P_3	P_4			
F_x	0.6884	0.7373	0.7431	0.749			
M_y	0.429	-0.4292	-0.3813	0.4246			
F_z	-0.7254	0.6756	-0.6691	0.6626			

Таблица 3 – Откорректированные значения сил и моментов по типу управления U_1

U_1	Без коррекции			С коррекцией		
	P_x Н	M_y Нм	P_z Н	P_{xk} Н	M_{yk} Нм	P_{zk} Н
-14	-367,04	-17,32	15,23	-365,73	0,78	0,45
-12	-314,6	-14,85	13,06	-314,31	0,82	0,68
-10	-262,17	-12,37	10,88	-261,21	0,94	0,96
-8	-209,73	-9,9	8,7	-208,98	0,57	0,47
-6	-157,3	-7,42	6,53	-156,75	0,2	-0,02
-4	-104,87	-4,95	4,35	-105,33	0,25	0,21
-2	-52,43	-2,47	2,18	-52,23	0,37	0,49
0	0	0	0	0	0	0
2	77,27	4,17	-2,88	76,89	-0,01	-0,42
4	154,53	8,35	-5,75	155,08	0,71	0,32
6	231,8	12,52	-8,63	230,8	1,3	0,95
8	309,07	16,7	-11,5	307,69	1,29	0,54
10	386,33	20,87	-14,38	384,58	1,28	0,12
12	463,6	25,04	-17,26	462,77	2,01	0,86
14	540,86	29,22	-20,13	538,49	2,59	1,49
σ	291,3615	14,9889	11,3241	290,4278	0,7335	0,4765

На рисунке 2 приведены графики функций $P_x(U_1)$, $M_y(U_1)$, $P_z(U_1)$, построенные по данным таблицы 3.

Как видно из графиков скорректированные значения сил и моментов близки к линейным значениям. Хорошие результаты удалось получить, скомпенсировав значения $P_x(U_1)$, $M_y(U_1)$, $P_z(U_1)$, особенно относительно момента и сил в поперечной плоскости ТНПА.

Устранение предложенным методом возникающих моментов и сил в поперечной плоскости при движении в продольной плоскости ТНПА

позволяет за счёт компенсации ошибок и паразитных сил выровнять систему движителей и обеспечить пропорциональное управление ДРК, как в полуавтоматическом режиме, так и в программном управлении.

Скомпенсированное управление при реализации регуляторов упоров ДРК облегчает задачу синтеза системы управления по наблюдаемой динамике, перспективной считается задача масштабирования системы управления, т.е. пропорциональное управление при нелинейных характеристиках упоров движителей как в режимах малого сигнала, так и высокой крутизны регулировочной характеристики.

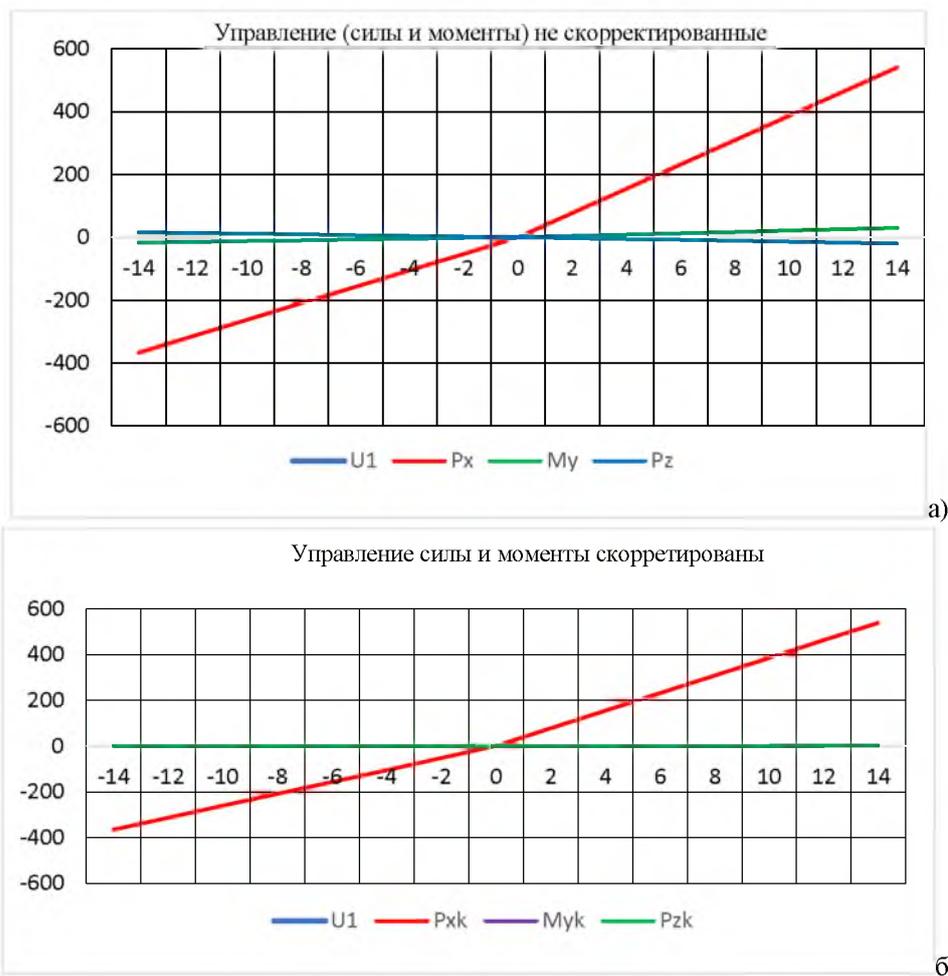


Рисунок 2 – Тяговые характеристики носителя ТНПА при изменении сигнала U1: а) не скомпенсированный вид характеристик; б) скомпенсированный

Вывод

Синтезированный в работе численный метод компенсации ошибок управления движителями двигательного рулевого комплекса позволяет решить задачу согласования упоров движителей телеуправляемого необитаемого аппарата при прямолинейном движении. Рассмотрены влияющие величины, и определен научно методический аппарат компенсации ошибок установки движителей, неравномерности упоров (тяги), отклонений параметров винтовых характеристик и других параметров.

В управлении необитаемыми телеуправляемыми аппаратами, единая система движителей используется как для маршевого перемещения, так и для маневрирования. Формируемая система команд при скомпенсированном типе управления позволяет реализовывать функции авторулевого и масштабируемый тип управления, позволяющий также эффективно производить работу бортовым комплектом инструментов и манипуляторов.

Литература

1. Данцевич И. М., Лютикова М. Н., Метрели Ю. Ю. Формализация задачи движе-

ния в продольно-поперечной плоскости телеуправляемых подводных аппаратов //Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 4. – № 2. – С. 168-177.
 2. Данцевич И. М., Лютикова М. Н. Моделирование нейросетевой структуры многослойного управления телеуправляемого подводного аппарата (ТПА) //Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова. – 2015. – № 1. – С. 25-26.
 3. Данцевич И.М. Разработка малогабаритного телеуправляемого необитаемого подводного аппарата гибридной компоновки //Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – № 3-1 (57).– С. 147-152.
 4. Лютикова М.Н., Данцевич И.М., Панькина С.И. Интеллектуальная подводная лаборатория // Серия конференций ИОР: Наука о Земле и окружающей среде. – ИОР Publishing, – 2021. – Т. 872. – №. 1. – С. 012003.
 5. Данцевич И. М., Лютикова М. Н. Результаты исследования управления системой

- «Судно-забортное оборудование» в продольно-вертикальной плоскости //Эксплуатация морского транспорта. – 2021. – №. 3. – С. 76-81.
6. Лютикова М.Н. Совершенствование управлением многоцелевым буксируемым комплексом с применением нейросетевого контроллера в асимптотике полиномов Бернштейна //Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – Т. 3. – №. 3. – С. 153-159.
 7. Игнатиади Е. К., Петушок И. К. Концепция моделирования внешней среды для морских робототехнических комплексов //ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА Учредители: Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики. – 2021. – Т. 1. – №. 1. – С. 292-295.
 8. Лебедев А. О., Лебедева М. П., Хомяков А. А. Общий подход к расчету параметров движения подводного аппарата //Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – С. 10.
 9. Овчинников К.Д., Сенишин А.А., Белая А.Б., Рыжов В.А. Исследование влияния параметров рулевой системы на характеристики управляемости волнового глайдера //Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 1 – № 3. – С.44-49.
 10. Шилль Ф.С. Распределенная связь в роях автономных подводных аппаратов. – Австралийский национальный университет. 2007. – №. THESIS_LIB.
 11. Нимейер, Гюнтер и др. «Телеробототехника». Справочник Springer по робототехнике. Спрингер, Чам, 2016. 1085–1108.
 12. Сяо Ю., Ли Т. (ред.). Умные корабли. – КИП Пресс, 2022.
 13. Рулевский В. М., Ляпунов Д. Ю. Математическое моделирование системы электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе в пакете Matlab/Simulink //Современные проблемы науки и образования. – 2015. – №. 2-1. – С. 210-210.
 14. Лукомский Ю.А., Чугункин В.С. Системы управления морскими подвижными объектами: Учебник – Л.: Судостроение, 1988. – 272 с.
 - underwater vehicles//Marine intelligent technologies. – 2021. - Т. 4. – №. 2. - С. 168-177.
 2. Dantsevich I. M., Lyutikova M. N. Modeling of the neural network structure of the multilayer control of a remote-controlled underwater vehicle (TPA) //Bulletin of Admiral F.F. Ushakov State Maritime University. – 2015. – №. 1. - С. 25-26.
 3. Dantsevich I.M. Development of a small-sized remote-controlled unmanned underwater vehicle of a hybrid arrangement//Marine intelligent technologies. – 2022. – № 3-1 (57). С. 147-152.
 4. Lyutikova M. N., Dantsevich I. M., Pankina S. I. The intelligent underwater laboratory //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2021. – Т. 872. – №. 1. – С. 012003.
 5. Dantsevich I. M., Lyutikova M. N. Results of the study of the control of the Ship-Sea Equipment system in the longitudinal-vertical plane//Operation of sea transport. – 2021. – №. 3. - С. 76-81.
 6. Lyutikova M.N. Improving the control of a multi-purpose towed complex using a neural network controller in the asymptotics of Bernstein polynomials//Marine intelligent technologies. - 2022. - Vol. 3. - No. 3. - S. 153-159.
 7. Ignatiadi E.K., Petushok I.K. Concept of environmental modeling for marine robotic complexes//EXTREME ROBOTICS Founders: Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics. – 2021. - Т. 1. – №. 1. - S. 292-295.
 8. Lebedev A. O., Lebedeva M. P., Khomyakov A. A. General approach to calculating the motion parameters of an underwater vehicle//Marine intelligent technologies. – 2019. - С. 10.
 9. Ovchinnikov K.D., Smishin A.A., Belaya A.B., Ryzhov V.A. Investigation of the influence of steering system parameters on the controllability characteristics of a wave glider//Marine intelligent technologies. – 2021. – Т. 1 - NO. 3. - С.44-49.
 10. Schill F.S. Distributed communications in swarms of autonomous underwater vehicles. - Australian National University, 2007. – №. THESIS_LIB.
 11. Niemeier, Gunther et al. "Telerobototechnika." Springer's Guide to Robotics. Springer, Cham, 2016. 1085–1108.
 12. Xiao Yu, Li T. (ed.). Smart ships. - QPR Press, 2022.
 13. Rulevsky V. M., Lyapunov D. Yu. Mathematical modeling of the power supply system of a remote-controlled uninhabited underwater vehicle with power transmission via an AC cable in the Matlab/Simulink//Modern problems of science and education. – 2015. – №. 2-1. - С. 210-210.
 14. Lukomsky Yu.A., Chugunkin V.S. Systems for managing marine moving objects: Textbook - L.: Shipbuilding, 1988. - 272 с.

References

1. Dantsevich I. M., Lyutikova M. N., Metreveli Yu. Yu. Formalization of the problem of movement in the longitudinal-transverse plane of tele-controlled