УДК: 629.584
DOI: 10.37102/1992-4429_2023_45_03_04
EDN: AQMKZC

УПРАВЛЕНИЕ МАРШЕВЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ ПОДВОДНОГО АППАРАТА, ИНВАРИАНТНОЕ К СКОРОСТИ ХОДА

В.В. Костенко

Статья посвящена разработке алгоритма распределения управляющих воздействий движительно-рулевого комплекса (ДРК) автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА), учитывающего влияние скорости хода на статические характеристики его маршевых движителей (МД). Реализация на практике такого алгоритма позволяет повысить точность траекторного движения и автономность АНПА за счет увеличения эффективности использования ДРК, а также независимость его управляющих воздействий. Предлагаемый алгоритм управления ДРК использует статическую характеристику МД с управляемым по моменту электроприводом, определенную по результатам гидродинамического расчета гребного винта, бассейновых испытаний движителя в швартовном режиме и нагрузочных испытаний приводного электродвигателя. Полученные результаты исследования позволяют в дальнейшем решить актуальную задачу адаптивного перераспределения упоров маршевых движителей между регуляторами движения аппарата вариацией порционных ограничений в соответствии с назначенным рейтингом и целевым значением управляющих воздействий ДРК. Приведен пример использования полученных технических решений для управления ДРК АНПА ММТ-300, разработанного в ИПМТ ДВО РАН.

Ключевые слова: подводный аппарат, маршевый движитель, скорость хода, статическая характеристика, управление по моменту, нагрузочные испытания, швартовные испытания.

Введение

Перспективным и востребованным в настоящее время инструментом исследования и освоения океана являются автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) [1–3]. К основным задачам, решаемым АНПА, относятся: мониторинг морских акваторий с исследованием рельефа дна и гидрофизических полей; поиск и инспекция технических и природных объектов на морском дне, освещение подводной обстановки и патрулирование охраняемых водных районов [4]. Эффективность решения перечисленных задач в значительной степени зависит от точности осуществления движения АНПА по заданной траектории с управляющими воздействиями движительно-рулевого комплекса (ДРК). При этом важно обеспечить соответствие реальных управляющих воздействий целевым значениям, определенным регуляторами движения [5–7]. Традиционно декомпозиция управления ДРК производится в соответствии со статической характеристикой, полученной в ходе бассейновых испытаний движителей в швартовном режиме [3, 5–7], хотя движение аппарата оказывает существенное влияние на эффективность гребного винта МД, которое не учитывается при распределении управляющих сигналов от регуляторов движения между движителями. При этом статическая характеристика МД, определяющая распределение его эффективности между конкурирующими каналами управления движением существенно зависит от скорости хода аппарата. Целью настоящей работы является оценка влияния скорости хода аппарата на статическую характеристику МД в стационарном режиме работы и разработка алгоритма декомпозиции управления ДРК, учитывающего это влияние. В данной постановке необходимо последовательное решение следующих задач:

- расчет тяги и момента сопротивления гребного винта МД в зависимости от частоты вращения и скорости хода аппарата;
- экспериментальное определение механической характеристики электропривода МД;

- определение статической характеристики МД с управляемым по моменту электроприводом и с учетом скорости хода АНПА;
- оценка недостатков алгоритма декомпозиции управляющих воздействий ДРК, определенного с учетом швартовной статической характеристики МД;
- разработка алгоритма декомпозиции управляющих воздействий ДРК, обеспечивающего их точную и независимую реализацию в режиме движения АНПА с установившейся скоростью хода.

1. Расчет тяги и момента сопротивления гребного винта МД в зависимости от частоты вращения и скорости хода АНПА

В режиме установившегося движения АНПА перемещается относительно воды с некоторой постоянной скоростью хода V_x, которая зависит от соотношения между суммарной тягой маршевых движителей и гидродинамического сопротивлениея корпуса аппарата. Для управляемого по моменту электропривода МД частота вращения вала будет определяться условием равенства между электродвижущим моментом и моментом сопротивления гребного винта (ГВ). При этом математической моделью ГВ принимают следующие соотношения [9–11]:

$$T_{МД} = K_T(\lambda)\ \rho\ n_s^2\ D^4\ g,$$
$$M_{ГВ} = K_M(\lambda)\ \rho\ n_s^2\ D^5\ g; \qquad (1)$$

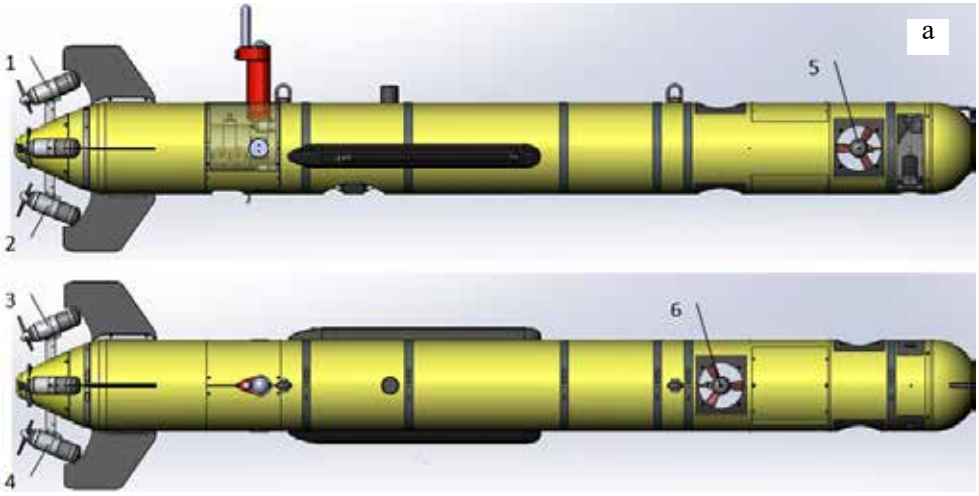
где $T_{МД}$ – упор ГВ, N; $M_{ГВ}$ – момент сопротивления ГВ, Нм; K_T, K_M– коэффициенты упора и момента ГВ, зависящие от относительной поступи λ; $\rho = 102$ – плотность воды, кг·с²/м⁴; $\lambda = V_x / (n_s\ D)$ – относительная поступь ГВ; $n_s = n_{эд} / 60$ – частота вращения ГВ, об/с; D – диаметр ГВ, м; $g = 9{,}81$ – ускорение свободного падения, м/с².

Коэффициенты упора $K_T(\lambda)$ и момента $K_M(\lambda)$ определяются в результате гидродинамического расчета гребного винта с известными характеристиками (диаметр, шаговое и дисковое отношение, количество и профиль лопастей) [3,12] и могут быть представлены аналитическими зависимостями от относительной поступи [13]:

$$K_T(\lambda) = K_{T0} + K_{T1}\ \lambda + K_{T2}\ \lambda^2,$$
$$K_M(\lambda) = K_{M0} + K_{M1}\ \lambda + K_{M2}\ \lambda^2, \qquad (2)$$

где K_{Ti}, K_{Mi} – коэффициенты интерполирующих полиномов, полученные в результате регрессионного анализа результатов гидродинамического расчета ГВ. В качестве объекта исследований был принят МД АНПА ММТ-300 разработки ИПМТ ДВО РАН на базе синхронного бесколлекторного электродвигателя с постоянными магнитами AT-Drive 50x14 производства АО «ПК НПО «Андроидная техника» [13]. Конструктивный облик АНПА ММТ-300 и его маршевого движителя представлен на рис. 1.

Параметры гребного винта этого движителя сведены в табл. 1, а внешний вид и зависимости коэффициентов упора и момента от относительной поступи показаны на рис. 2. В табл. 1 приняты следующие обозначения: H / D – шаговое отношение, A / A_d – дисковое отношение, Z – количество лопастей; K_{T0}, K_{T1}, K_{T2}, K_{M0}, K_{M1}, K_{M2} – определенные в ходе регрессионного анализа результатов гидродинамического расчета ГВ коэффициенты интерполирующих полиномов зависимостей (2).



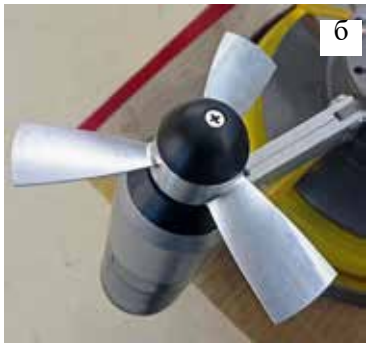


Рис. 1. Конструктивный облик АНПА ММТ-300:
а – движительной рулевой комплекс (1–4 маршевые движители, 5–6 – подруливающие устройства; б – маршевый движитель

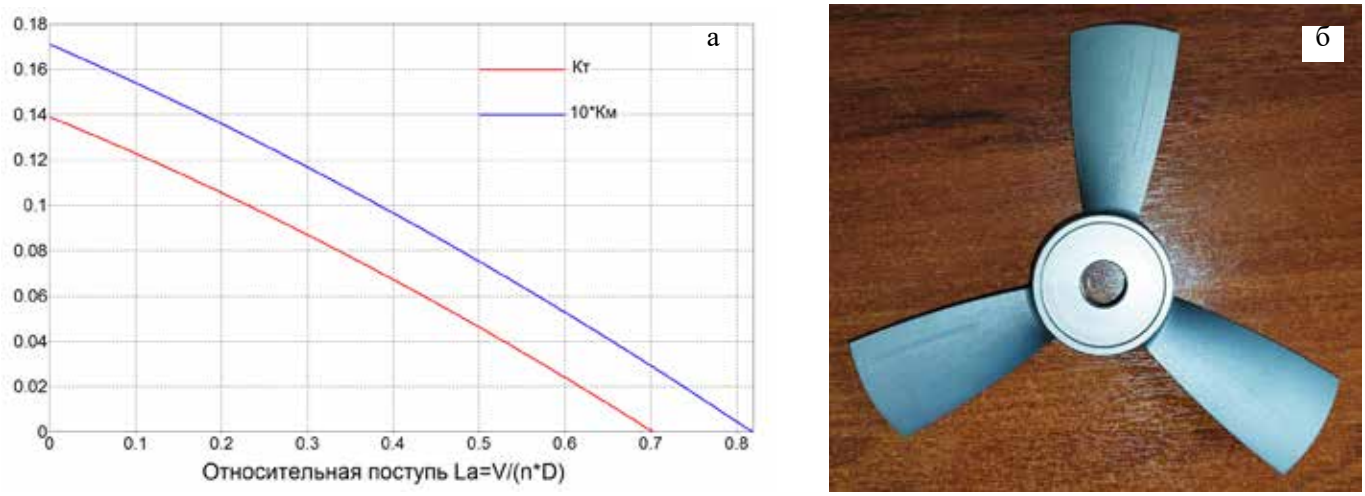


Рис. 2. Гребной винт МД АНПА ММТ-300:
а – кривые действия, б – внешний вид

Таблица 1. Параметры ГВ МД АНПА ММТ-300

Параметр	D, м	H/D	A/A_d	Z	K_{T0}	K_{T1}	K_{T2}	K_{M0}	K_{M1}	K_{M2}
Значение	0,14	0,60	0,26	3	0,139	-0,155	-0,061	0,0171	-0,0164	-0,0055

В соответствии с формулами (1) и (2) были определены зависимости момента сопротивления и упора выбранного ГВ с параметрами из табл. 1 от частоты вращения и для скоростей хода V_x = 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 м/с, показанные на рис. 2. В ходе бассейновых испытаний для швартовного режима работы ($V_x = 0$) были получены значения измеренного упора движителя и рассчитанного с учетом нагрузочных испытаний электропривода крутящего момента на валу ГВ для кодов управления МД 127/120/110/100/90/80/70/60/50/40 [14]. Из графиков рис. 3 видна высокая степень совпадения результатов расчета момента и упора МД по соотношениям (1, 2) с их экспериментальными значениями, полученными в ходе нагрузочных испытаний электропривода и швартовных испытаний в бассейне. Это позволяет сделать вывод о достоверности принятой модели ГВ (1, 2) в установившемся режиме работы МД.

2. Экспериментальное определение характеристик электропривода МД

Параметры электропривода в установившемся режиме работы определяются его механической характеристикой, полученной в ходе нагрузочных

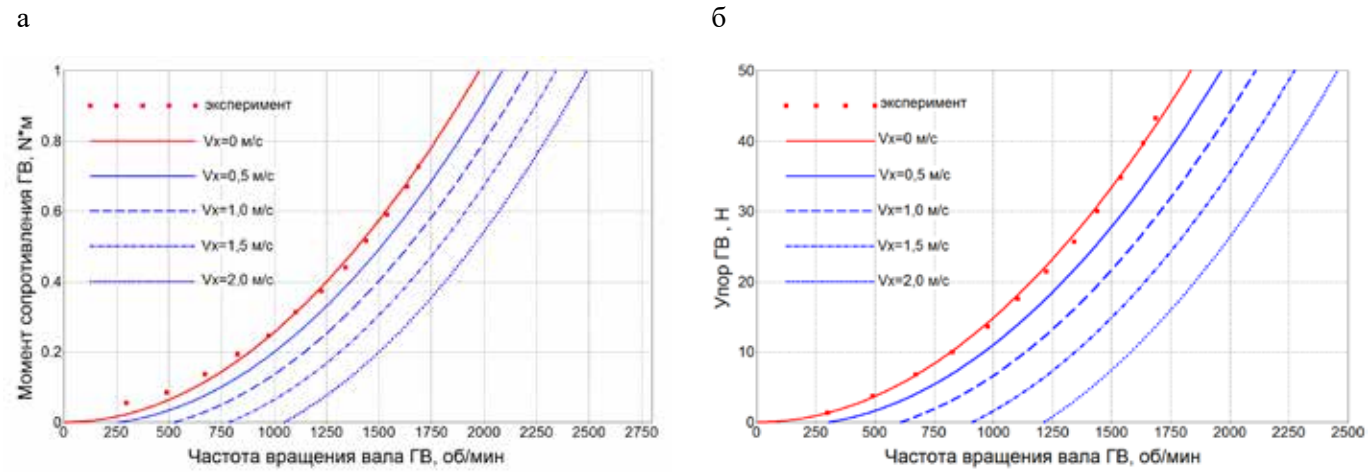


Рис. 3. Зависимость характеристик ГВ от частоты вращения и скорости набегающего потока: а – момент сопротивления ГВ, б – тяга движителя

а б

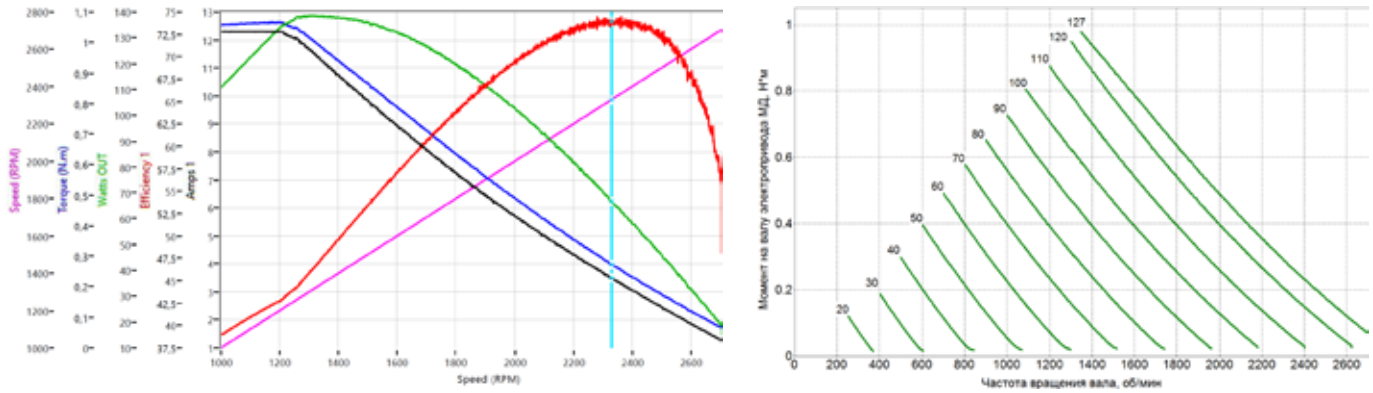


Рис. 4. Результаты нагрузочных испытаний электропривода МД на базе AT-Drive 50x14:
а – результат испытаний привода для кода управления +127, б – семейство механических характеристик привода для кодов управления от +20 до +127

испытаний. Для объективной оценки работы электропривода МД необходимо семейство его экспериментальных механических характеристик во всем диапазоне кода управления электропривода. Для получения такого семейства механических характеристик электропривода на базе бесколлекторного двигателя AT-Drive 50x14 был использован нагрузочный стенд, основу которого составляет гистерезисный тормоз [14].

Процедура испытаний электропривода заключается в измерении частоты вращения вала двигателя, тока потребления и напряжения питания его блока управления для известных значений нагрузочного момента, который создается гистерезисным тормозом стенда. При этом электродвижущий момент двигателя соответствует заданному коду управления привода, а момент нагрузки гистерезисного тормоза изменяется либо в ручном режиме, либо по программе в пределах заданного диапазона. Результаты испытаний электропривода регистрируются программным обеспечением «M-Test» в виде графиков зависимости его параметров от частоты вращения (см. рис. 4, *а*) и сохраняются в табличном Excel-файле, в соответствии с которым строятся графики семейства механических характеристик электропривода для кодов управления 20/30/40/50/60/70/80/90/100/ 110/120/127 (см. рис. 4, *б*) [14].

Полученные в результате нагрузочных испытаний электропривода данные позволили подтвердить достоверность модели поведения ГВ в установившемся режиме на основании хорошего совпадения момента сопротивления винта, определенного по соотношениям (1, 2), с экспериментально определенным моментом электропривода при одинаковом значении частоты вращения вала [14].

3. Определение статической характеристики МД с управляемым по моменту электроприводом

Задачей расчета является определение зависимости упора маршевого движителя от кода управления в режиме установившегося движения АНПА по экспериментальной механической характеристике приводного электродвигателя и кривым действия используемого гребного винта. Для управляемого по моменту электропривода МД частота вращения вала будет определяться условием равенства между электродвижущим моментом и моментом сопротивления гребного винта (ГВ):

$$M_{ГВ} = K_M(\lambda)\ \rho\ (n/60)^2\ D^5\ g = M_{ЭП}(n, N). \qquad (3)$$

Расчет установившегося упора МД по известным значениям скорости хода и заданному коду управления его электропривода производится в два этапа, которые иллюстрируются рис. 5. На первом этапе (см. рис. 5, *а*) находится частота вращения вала МД, соответствующая точке пересечения экспериментальной механической характеристики привода $M_{ЭП}(n, N)$ с графиком расчетной зависимости момента ГВ $M_{ГВ}(V_x, n)$. На втором этапе по соотношениям (1, 2) определяется упор МД для найденного значения частоты вращения вала электропривода и известной скорости хода аппарата (см. рис. 5, *б*). В такой последовательности находится семейство статических характеристик МД для скоростей хода 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 м/с, которое показано на графиках рис. 6 и 7.

В результате регрессионного анализа данных расчета семейства статических характеристик (см. рис. 7, *б*) средствами программы Advanced Grapher [14,15] было определено аналитическое представление статической характеристики МД для всего диа-

а б

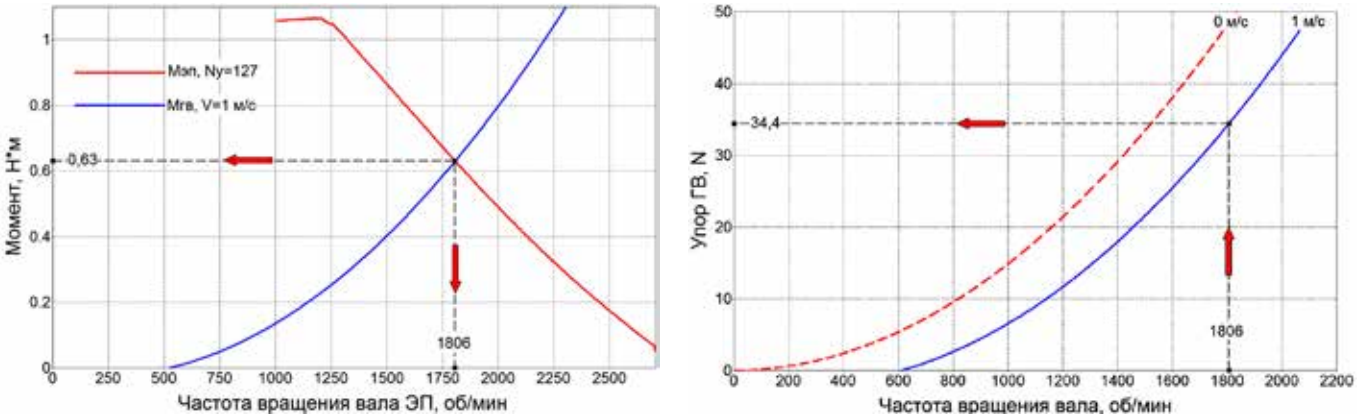


Рис. 5. Расчет упора МД по коду управления электропривода и скорости хода АНПА:
а – *оп*ределение частоты вращения по равенству моментов ЭП и ГВ, б – определение упора МД по частоте вращения ГВ

а б

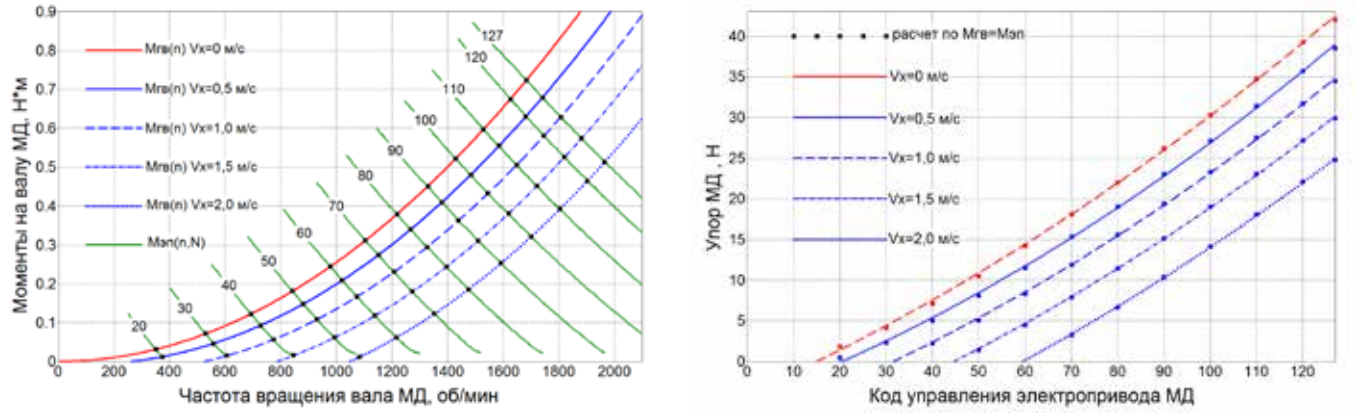


Рис. 6. Зависимость упора МД от кода управления для известной скорости хода АНПА:
а – *оп*ределение частоты вращения по моментам ЭП и ГВ, б – определение упора МД

а б

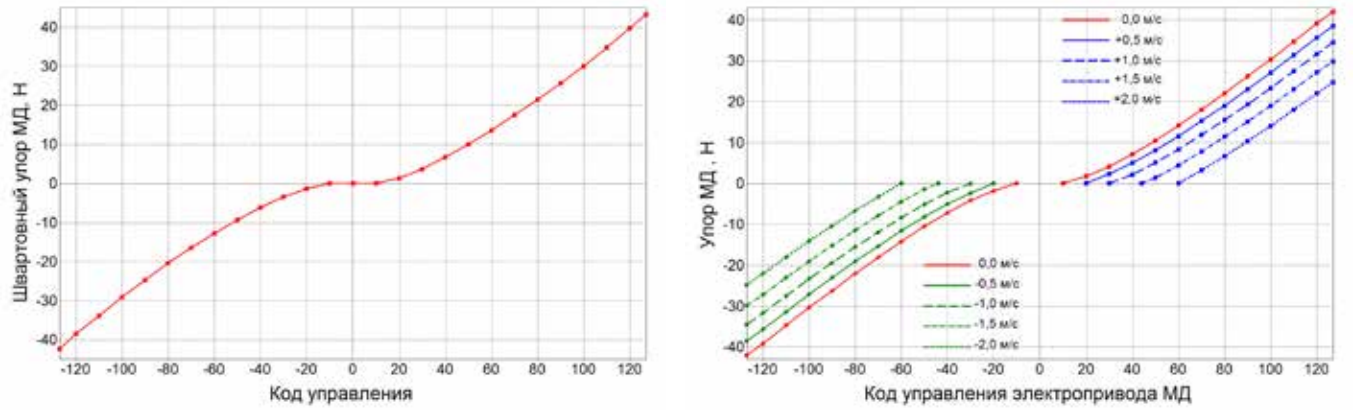


Рис. 7. Статическая характеристика МД АНПА ММТ-300:
а – *шв*артовная характеристика МД, б – семейство статических характеристик МД для скоростей хода 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 м/с

пазона скоростей хода АНПА (4). При этом принято допущение о том, что направление упора МД и скорости хода совпадают во всех режимах установившегося движения АНПА. В табл. 2 отражена выявленная зависимость коэффициентов интерполяции $T_{МД}(N)$ от скорости хода аппарата:

$$T_{МД}(N) = K_{F0}(V_x)signN + K_{F1}(V_x)N + K_{F2}(V_x)N|N|, \quad (4)$$
$$T_{МД}(N) = 0 \text{ при } |N| \le K_{F0}(V_x).$$

Таблица 2. Зависимость коэффициентов интерполяции $T_{МД}(N)$ от скорости хода

Параметр	Скорость хода, м/с				
	0	0,5	1,0	1,5	2,0
K_{F0}	-4	-5	-8	-11	-15
K_{F1}	0,254	0,215	0,211	0,210	0,208
K_{F2}	$8{,}82*10^{-4}$	$10{,}2*10^{-4}$	$9{,}65*10^{-4}$	$9{,}07*10^{-4}$	$8{,}67*10^{-4}$

4. Декомпозиция управляющих воздействий ДРК без учета скорости хода

Для дальнейших исследований вариантов декомпозиции управляющих воздействий была принята традиционная для разработок ИПМТ компоновочная схема ДРК, состоящая из четырех маршевых жестко закрепленных движителей, расположенных попарно во взаимно перпендикулярных плоскостях под углом 22,5° к продольной оси, и носового вертикального подруливающего движителя (рис. 8) [3, 8, 13]. Выбранная компоновочная схема ДРК обусловлена многоцелевым назначением АНПА ММТ-300. При этом необходимо обеспечивать не только движение на «крейсерской» скорости 1; 1,5 м/с при гидроакустической съемке поверхности дна, но и его фототелевизионное обследование на скоростях «позиционирования» 0; 0,7 м/с, когда для стабилизации глубины гидродинамических сил от набегающего потока недостаточно и необходимы дополнительные средства создания вертикального управляющего воздействия ДРК.

Управляющие воздействия рассматриваемого ДРК определяются очевидными соотношениями:

$$\begin{aligned} F_x &= (T_u + T_d + T_l + T_r)\cdot\cos\delta, \\ F_y &= (T_u - T_d)\cdot\sin\delta + T_b, \\ F_z &= (T_r - T_l)\cdot\sin\delta, \\ M_y &= (T_r - T_l)\cdot\sin\delta\cdot L_s, \\ M_z &= T_b\cdot L_b - (T_u - T_d)\cdot\sin\delta\cdot L_s, . \end{aligned} \quad (5)$$

где $O_м XYZ$ – связанная система координат (ССК) с началом в центре масс аппарата; F_x, F_y, F_z – продольный, вертикальный и боковой упоры ДРК; M_y, M_z – моменты ДРК по курсу и дифференту; T_u, T_d, T_l, T_r – упоры верхнего, нижнего, левого и правого маршевых движителей; T_b – упор вертикального подруливающего движителя; δ – угол наклона маршевых движителей к продольной оси ССК аппарата; L_s, L_b – плечо маршевой группы движителей и вертикального подруливающего движителя соответственно.

Для обеспечения независимости каналов управления ходом, дифферентом и курсом аппарата с учетом их «порционных» приоритетов необходимо ограничить управляющие воздействия ДРК, сформированные каналами регуляторов движения, в со-

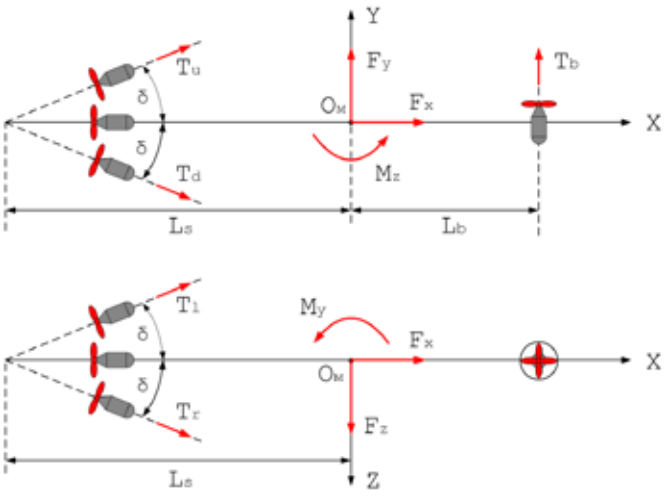


Рис. 8. Компоновочная схема ДРК АНПА ММТ-300

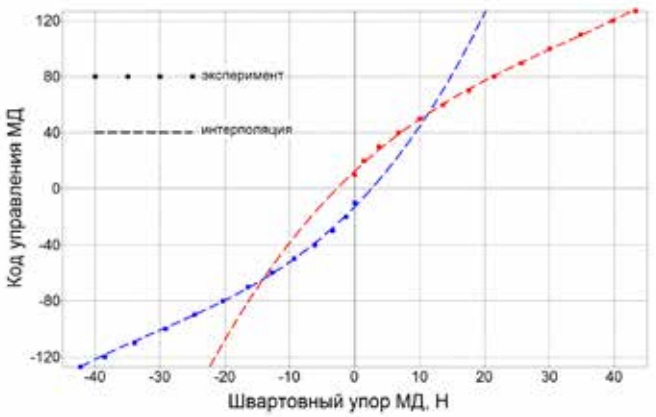


Рис. 9. Обратная статическая характеристика МД АНПА ММТ-300 (швартовный режим)

ответствии с максимальной достижимой тягой МД следующим образом [3,8]:

$$T_{U\text{ц}} = T_{X\text{ц}} - T_{\psi\text{ц}},\ T_{D\text{ц}} = T_{X\text{ц}} + T_{\psi\text{ц}},\ T_{L\text{ц}} = T_{X\text{ц}} - T_{\varphi\text{ц}},\ T_{R\text{ц}} = T_{X\text{ц}} + T_{\varphi\text{ц}};$$

$$T_{x\text{ц}} = \begin{cases} \dfrac{F_{x\text{ц}}}{4\cos\delta}\Pi_x, \text{ для } \left|\dfrac{F_{x\text{ц}}}{4\cos\delta}\right| < T_{\text{ш}}^{\max} \\ T_{\text{ш}}^{\max}\cdot\Pi_x\cdot sign(F_{x\text{ц}}), \text{ для } \left|\dfrac{F_{x\text{ц}}}{4\cos\delta}\right| \geq T_{\text{ш}}^{\max} \end{cases},$$

$$T_{\varphi\text{ц}} = \begin{cases} \dfrac{M_{y\text{ц}}}{2L_s\sin\delta}\Pi_\varphi, \text{ для } \left|\dfrac{M_{y\text{ц}}}{2L_s\sin\delta}\right| < T_{\text{ш}}^{\max} \\ T_{\text{ш}}^{\max}\cdot\Pi_\varphi\cdot sign(M_{y\text{ц}}), \text{ для } \left|\dfrac{M_{y\text{ц}}}{2L_s\sin\delta}\right| \geq T_{\text{ш}}^{\max} \end{cases},$$

$$T_{\psi\text{ц}} = \begin{cases} \dfrac{M_{z\text{ц}}}{2L_s\sin\delta}\Pi_\psi, \text{ для } \left|\dfrac{M_{z\text{ц}}}{2L_s\sin\delta}\right| < T_{\text{ш}}^{\max} \\ T_{\text{ш}}^{\max}\cdot\Pi_\psi\cdot sign(M_{z\text{ц}}), \text{ для } \left|\dfrac{M_{z\text{ц}}}{2L_s\sin\delta}\right| \geq T_{\text{ш}}^{\max} \end{cases}; \quad (6)$$

где $F_{x\text{ц}}$, $M_{y\text{ц}}$, $M_{z\text{ц}}$ – целевые значения управляющих воздействий ДРК, определенные регуляторами движения; $T_{x\text{ц}}$, $T_{\psi\text{ц}}$, $T_{\varphi\text{ц}}$ – целевые значения упора каждого из маршевых движителей, обеспечивающие реализацию целевых управляющих воздействий регуляторов хода, дифферента и курса соответственно; $T_{\text{ш}}^{\max}$ – ограничение упора маршевого движителя, определенное в ходе швартовных испытаний (см. рис. 7, *а*); Π_x, Π_ψ, Π_φ – коэффициенты «порционного» распределения эффективности маршевых движителей между регуляторами хода, дифферента и курса соответственно; $T_{U\text{ц}}$, $T_{D\text{ц}}$, $T_{L\text{ц}}$, $T_{R\text{ц}}$ – целевые значения упоров маршевых движителей, обеспечивающие независимую отработку управляющих воздействий при условиях $\Pi_x + \Pi_\psi = 1$ и $\Pi_x + \Pi_\varphi = 1$.

При декомпозиции управления ДРК без учета скорости хода аппарата для вычисления кодов управления МД, соответствующего упомянутым выше целевым значениям упоров ($N_{U\text{ц}}$, $N_{D\text{ц}}$, $N_{L\text{ц}}$, $N_{R\text{ц}}$), используется обратная швартовной статической характеристике движителей зависимость $N(T_{\text{ш}})$ (рис. 9), аналитическая форма которой определена в соответствии со следующей интерполяцией результатов швартовных испытаний МД:

$$N(T_{\text{ш}}) = K_{N00} + K_{N01}T_{\text{ш}} + K_{N02}T_{\text{ш}}^2 + K_{N03}T_{\text{ш}}^3$$
$$\text{при } 0{,}5N < T_{\text{ш}} \leq 43N,$$
$$N(T_{\text{ш}}) = 0 \text{ при } |T_{\text{ш}}| \leq 0{,}5\,N,$$
$$N(T_{\text{ш}}) = K_{N10} + K_{N11}T_{\text{ш}} + K_{N12}T_{\text{ш}}^2 + K_{N13}T_{\text{ш}}^3$$
$$\text{при } -0{,}5N > T_{\text{ш}} \geq -43N, \quad (7)$$

где $-127 \leq N \leq +127$ – код управления МД, $T_{\text{ш}}$ – тяга МД в швартовном режиме; K_{N0i}, K_{N1i} – коэффициенты интерполирующих полиномов (3), значения которых приведены в табл. 3; $i = 0 \div 3$.

Таблица 3. Коэффициенты интерполяции обратной функции $N(T_{\text{ш}})$

K_{N00}	K_{N01}	K_{N02}	K_{N03}	K_{N10}	K_{N11}	K_{N12}	K_{N13}
12,7	4,336	-0,070	7,29*10^{-4}	-12,7	4,738	0,089	9,68*10^{-4}

5. Декомпозиция управляющих воздействий ДРК с учетом скорости хода

В результате описанного выше распределения управляющих воздействий ДРК в соответствии со швартовными характеристиками МД реальные управляющие воздействия F_x, M_y, M_z, формируемые ДРК, будут существенно отличаться от определенных регуляторами движения целевых значений $F_{x\text{ц}}$, $M_{y\text{ц}}$, $M_{z\text{ц}}$ за счет влияния скорости хода на упоры маршевых движителей T_U, T_D, T_L, T_R. При этом увеличение скорости хода аппарата будет приводить к уменьшению эффективности ДРК, которую необходимо компенсировать изменением настроек регуляторов движения. Без такой компенсации с увеличением скорости хода будет увеличиваться ошибка стабилизации заданного курса и глубины погружения, следствием которой станет критическое отклонение аппарата от заданной траектории движения.

Предлагаемая компенсация влияния скорости хода на управляющие воздействия ДРК реализуется в два этапа. На первом этапе для обеспечения независимости каналов управления движением целевые значения упоров МД ограничиваются с учетом текущей скорости хода, а также значений коэффициентов «порционного» распределения эффективности движителей между регуляторами хода, дифферента и курса Π_x, Π_ψ, Π_φ. При этом максимальное достижимое на данный момент значение упора $\pm T_{\max}(V_x)$, соответствующее максимальным кодам управления ±127, определяется соотношением (4).

На втором этапе в соответствии с выражением (6), где заменяем $T_{\text{ш}}^{\max}$ на $\pm T_{\max}(V_x)$, вычисляются целевые значения упоров $T_{U\text{ц}}$, $T_{D\text{ц}}$, $T_{L\text{ц}}$, $T_{R\text{ц}}$, после чего в соответствии с семейством обратных статических характеристик движителей $N(T, V_x)$ определяются целевые значения кодов управления МД для извест-

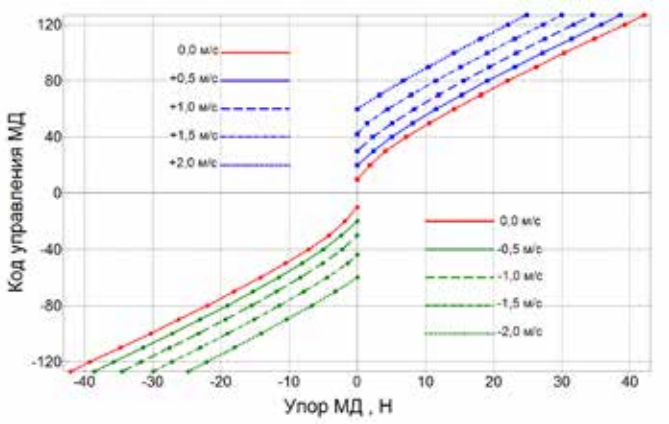


Рис. 10. Семейство обратных статических характеристик МД АНПА ММТ-300 для скоростей хода 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 м/с

Таблица 4

Зависимость коэффициентов интерполяции $N(T,V_x)$ от скорости хода

Параметр	Скорость хода, м/с				
	0	0,5	1,0	1,5	2,0
$T_{\max}$, N	±42	±38,5	±34,5	±29,9	±24,8
K_{N0S}	11,7	20,6	30,8	43,2	60,0
K_{N1S}, N^{-1}	4,32	4,04	3,97	3,95	3,17
K_{N3S}, N^{-3}	-0,073	-0,062	-0,063	-0,074	-0,031
K_{N3S}, N^{-3}	$8{,}51*10^{-4}$	$7{,}43*10^{-4}$	$8{,}33*10^{-4}$	$12{,}1*10^{-4}$	$5{,}00*10^{-4}$

ной скорости хода аппарата. При этом «ослабление» упоров МД будет компенсироваться соответствующим увеличением кода управления.

Для реализации предлагаемого подхода необходимо получить аналитическое представление обратной статической характеристики движителей. Эту задачу можно решить графоаналитически на основании полученных ранее статических характеристик МД, рассчитанных для скоростей хода 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 м/с (см. рис. 7, *б*). На рис. 10 показаны полученные в результате «обращения» графики обратных статических характеристик МД АНПА ММТ-300 для скоростей хода 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 м/с.

В результате интерполяции расчетных значений семейства обратных статических характеристик, показанных на рис. 10, была определена следующая аналитическая зависимость для кода управления МД $N(T,V_x)$:

$$N(T,V_x)= K_{N0S}(V_x)signT + K_{N1S}(V_x)T + K_{N2S}(V_x)T|T| + $$
$$+K_{N3S}(V_x)T^3 \text{ при } 0{,}5N < |T| \le T_{\max}(V_x),$$
$$N(T,V_x) = 0 \text{ при } |T| \le 0{,}5\,N; \qquad (8)$$

где $K_{N0S}, K_{N1S}, K_{N2S}, K_{N3S}, T_{\max}$ – коэффициенты интерполирующих полиномов, зависимость которых от скорости хода приведена в табл. 4. Функциональная схема распределения управляющих воздействий ДРК с компенсацией влияния скорости хода показана на рис. 11.

В приведенной функциональной схеме приняты следующие условные обозначения: $F_{xц}$, $M_{yц}$, $M_{zц}$ – целевые значения управляющих воздействий ДРК,

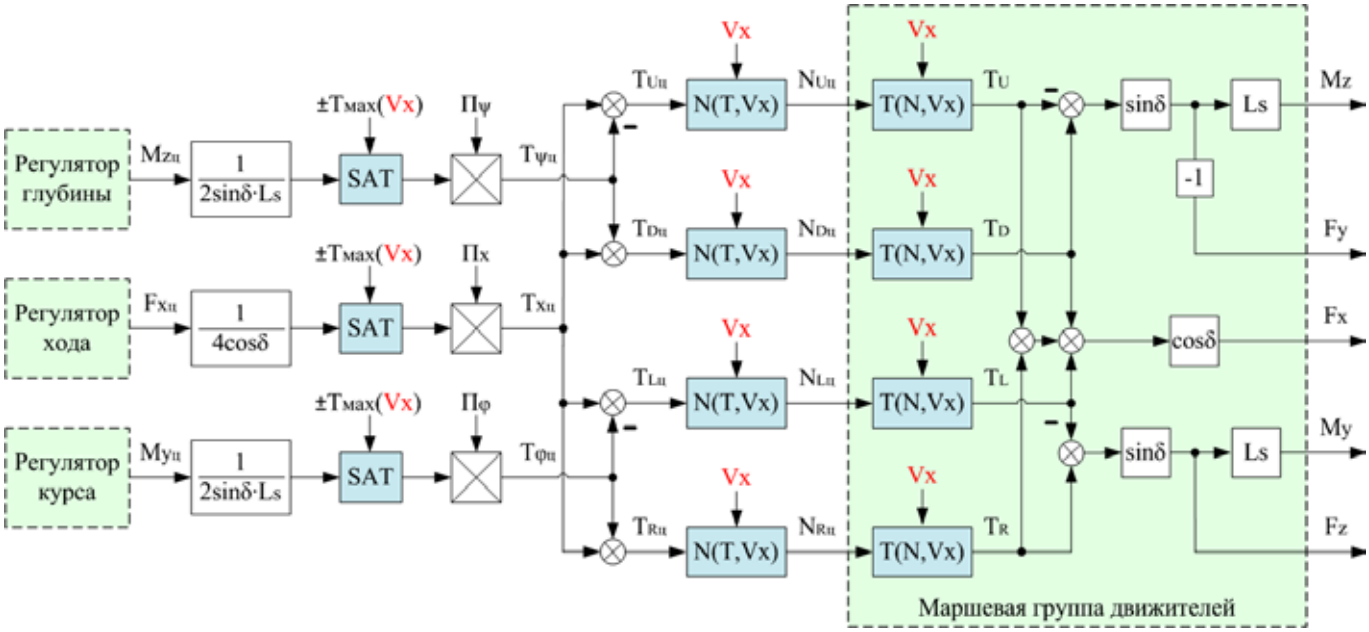


Рис. 11. Распределение управляющих воздействий ДРК между маршевыми движителями с учетом скорости хода

определенные регуляторами движения; $T_{x\text{ц}}$, $T_{\psi\text{ц}}$, $T_{\varphi\text{ц}}$ – целевые значения упора каждого из маршевых движителей, обеспечивающие реализацию целевых управляющих воздействий регуляторов хода, дифферента и курса соответственно; $\pm T_{\max}(V_x)$ – ограничение упора маршевого движителя, определенное по аналитическому представлению (4) семейства статических характеристик; Π_x, Π_ψ, Π_φ – коэффициенты «порционного» распределения эффективности маршевых движителей между регуляторами хода, дифферента и курса соответственно; $T_{U\text{ц}}$, $T_{D\text{ц}}$, $T_{L\text{ц}}$, $T_{R\text{ц}}$ – целевые значения упоров маршевых движителей, обеспечивающие независимую отработку управляющих воздействий при условиях $\Pi_x + \Pi_\psi = 1$ и $\Pi_x + \Pi_\varphi = 1$; $N(T, V_x)$ – зависимость кода управления от упора маршевого движителя (8), приведенная на рис. 10; $T(N, V_x)$ – реальная статическая характеристика МД с учетом влияния скорости хода (см. рис. 7, *б*); T_U, T_D, T_L, T_R – реальные значения упоров маршевых движителей с учетом влияния скорости хода; F_x, M_y, M_z – реальные значения управляющих воздействий ДРК с учетом скорости хода; F_y, F_z – «побочные» силовые воздействий ДРК, возникающие при формировании управляющих моментов M_z и M_y соответственно.

Заключение

Резюмируя проведенное исследование, можно сделать следующие выводы:

- разработана методика расчета статической характеристики маршевого движителя на установившемся ходу аппарата, основанная на результатах нагрузочных испытаний управляемого по моменту электропривода и гидродинамического расчета гребного винта, учитывающего влияние скорости хода;
- установлено, что декомпозиция управления ДРК, основанная на швартовной статической характеристике МД без учета скорости хода, приводит к уменьшению реальных значений упоров движителей и управляющих воздействий комплекса в целом, вследствие чего увеличиваются ошибки стабилизации глубины погружения и курса с увеличением скорости хода аппарата до недопустимых для выполнения миссии значений;
- разработан алгоритм распределения управляющих воздействий ДРК между маршевыми движителями, который обеспечивает их точную и независимую реализацию за счет использования аналитического представления интерполирующими полиномами семейства статических характеристик маршевых движителей, определенного для диапазона скоростей хода аппарата от 0 до 2 м/с;
- предложенные в работе алгоритмы коррекции управляющих воздействий ДРК просты и обладают невысокой вычислительной сложностью, что позволяет реализовать их бортовыми устройствами управления АНПА;
- найденные технические решения обеспечивают также возможность оценки позиционных сил и моментов, действующих на аппарат в установившихся режимах движения в ходе выполнения маршрутного задания;
- в развитие проведенных исследований планируется разработка тензометрического комплекса для определения и регистрации упоров маршевых движителей на борту подводного аппарата при выполнении маршрутного задания, который позволит уточнить зависимость статической характеристики МД от скорости хода.

Работа выполнена по теме госзадания ИПМТ ДВО РАН «Исследование и разработка принципов и способов создания многофункциональных робототехнических комплексов для изучения и освоения Мирового океана», № гос. регистрации 121030400088-1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д., Касаткин Б.А., Киселев Л.В. и др. Автоматические подводные аппараты. Л.: Судостроение, 1981. 223 с.
2. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы: системы и технологии / под общ. ред. М.Д. Агеева, М.: Наука, 2005. 223 с.
3. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / под ред. Л.В. Киселева. Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2018. 368 с.
4. Матвиенко Ю.В., Борейко А.А., Костенко В.В., Львов О.Ю., Ваулин Ю.В. Комплекс робототехнических средств для выполнения поисковых работ и обследования подводной инфраструктуры на шельфе // Подводные исследования и робототехника. 2015. №1(19). С. 4–15.
5. Костенко В.В. Алгоритмы управления движительно-рулевым комплексом привязного телеуправляемого подводного аппарата // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 9. С. 31–36.
6. Костенко В.В., Павин А.М. К вопросу обеспечения независимости управляющих воздействий движительно-рулевого комплекса подводного аппарата. // Материалы 6-й науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана». Владивосток, 2015. С. 118–123.

7. Kostenko V.V., Tolstonogov A.Yu. AUV Thrust Allocation with Variable Constraints. ADV. Syst. Sci Appl. 2017. Vol. 3. P. 1–8. URL: http://ijassa.ipu.ru/ojs/ijassa/article/view/502.

8. Киселев Л.В., Медведев А.В. Сравнительный анализ и оптимизация динамических свойств автономных подводных роботов различных проектов и конфигураций // Подводные исследования и робототехника. 2012. № 1(13). С. 24–35.

9. Войткунский Я.И., Першиц Р.Я., Титов И.А. Справочник по теории корабля. Л.: Судпромгиз, 1960. 688 с.

10. Басин А.М., Миниович И.Я. Теория и расчет гребных винтов. Л. Судостроение, 1963. 766 с.

11. Гофман А.Д. Движительно рулевой комплекс и маневрирование судна: справочник. Л.: Судостроение, 1988. 360 с.

12. Daidola J.C., Johnson F.M. Propeller Selection and Optimization Program. Manual for the Society of Naval Architects and Marine. NY.: Society of Naval Architects and Marine, 1992. 258 p.

13. Костенко В.В., Толстоногов А.Ю. Задача декомпозиции управления движением АНПА с учетом изменяющихся ограничений маршевых движителей // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2019. № 1 (203). С. 199–211.

14. Костенко В.В., Толстоногов А.Ю. Оценка характеристик маршевого движителя подводного аппарата по результатам нагрузочных испытаний электропривода // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 2 (40). С.4–12. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_40_02_01. EDN: AWRENY.

15. Евстегнеева А. С. Использование компьютерной программы Advanced Grapher как средство реализации принципа наглядности в процессе обучения математике // Молодой ученый. 2018. №. 2. С. 108–112.

Об авторе

КОСТЕНКО Владимир Владимирович, к.т.н., заведующий лабораторией исполнительных устройств и систем телеуправления, ведущий научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. акад. М.Д. Агеева ДВО РАН

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Научные интересы: Подводная робототехника, системы управления движением, движительно-рулевые комплексы, динамические модели, буксируемые системы

Тел.: +7 (984) 145-43-85

E-mail: kostenko@marine.febras.ru, kosten.ko@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3821-3787

Для цитирования:

Костенко В.В. УПРАВЛЕНИЕ МАРШЕВЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ ПОДВОДНОГО АППАРАТА, ИНВАРИАНТНОЕ К СКОРОСТИ ХОДА // Подводные исследования и робототехника. 2023. №. 3 (45). С. 30–40. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_45_03_04. EDN: AQMKZC.

DOI: 10.37102/1992-4429_2023_45_03_04

AUV PROPULSION SYSTEM CONTROL INVARIANT TO TRAVEL SPEED

V.V. Kostenko

The aim of the study is to improve the accuracy of the trajectory movement of autonomous underwater vehicles (AUVs) through the use of control algorithms that take into account the influence of travel speed on the static characteristics of march thrusters (MT). A formal statement of the problem of determining the thrust of an MT with a torque-controlled electric drive for a known value of the steady-state travel speed is given. A technique has been developed for assessing the effect of the steady travel speed of the AUV on the thrust of the MT, based on the results of hydrodynamic calculation of the propeller and load tests of the drive motor, which made it possible to determine the analytical representation of the static characteristic of the MT with a torque-controlled electric drive. The results obtained make it possible to further solve the actual problem of adaptive redistribution of the main propulsion stops between the vehicle motion controllers by varying the portion restrictions in accordance with the assigned rating and the target value of the control actions. Thus, the maximum efficiency of using the capabilities of the propulsion and steering complex can be ensured, as well as the accuracy of the AUV trajectory movement can be increased.

Keywords: Autonomous underwater vehicles, march thrusters, travel speed, static characteristic, torque control, electric drive load tests, pool propulsion tests.

References

1. Ageev M.D., Kasatkin B.A., Kiselev L.V. et al. Avtomaticheskie podvodnye apparaty. L.: Sudostroenie, 1981. 224 p.
2. Ageev M.D., Kiselev L.V., Matvienko Ju.V. et al. Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy i tehnologii ed. M.D. Ageeva. M.: Nauka, 2005. 223 p.
3. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F. Underwater robotic systems: systems, technologies, applications ed. L.V. Kiselev; IMTP FEB RAS. Vladivostok, 2018. 368 p.
4. Matvienko Yu.V., Boreiko A.A., Kostenko V.V., Lvov O.Yu., Vaulin Yu.V. Complex robotic tools to perform searches and surveys of underwater infrastructure on the shelf. Underwater investigation and robotics. 2015. No. 1 (19). P.4-15.
5. Kostenko V.V. Control Algorithms by Motive-Steering Complex of Related Tele-Controlled Submarine Apparatus. Mechatronics, automation, control. 2006. No. 9. P.31-36.
6. Kostenko V.V., Pavin A.M. On the issue of ensuring the independence of the control actions of the propulsion and steering complex of the underwater vehicle. Materials of the 6th Scientific and Technical Conference "Technical problems of the development of the world ocean", Vladivostok, 2015, pp. 118-123.
7. Kostenko V.V., Tolstonogov A.Yu. AUV Thrust Allocation with Variable Constraints. ADV. Syst. SciAppl. 2017. No. 3. P. 1–8. – http://ijassa.ipu. ru/ojs/ijassa/article/view/502
8. Kiselev L.V., Medvedev A.V. Comparative analysis and optimization of the dynamic properties of autonomous underwater robots of various designs and configurations. Underwater investigation and robotics. 2012 No. 1 (13). P. 24-35.
9. Vojtkunskij Ja.I., Pershic R.Ja., Titov I.A. Spravochnik po teorii korablja. L.: Sudpromgiz, 1960. 688 p.
10. Basin A.M., Miniovich I.Ja. Teorija i raschet grebnyh vintov. L.: Sudostroenie, 1963. 766 p.
11. Gofman A.D. Dvizhitel'no-rulevoj kompleks i manevrirovanie sudna: spravochnik. L.: Sudostroenie, 1988. 360 p.
12. Daidola J.C, Johnson F.M (1992) Propeller Selection and Optimization Program. Manual for the Society of Naval Architects and Marine. NY.: Society of Naval Architects and Marine, 1992, 258 p.
13. Kostenko V.V., Tolstonogov A.Yu. AUV's Motion Control Allocation with Variable Properties of Propulsion System. IzvestiyaSFedU. Engineering Sciences, 2019, No. 1 (203), pp. 199-211.
14. Kostenko V.V., Tolstonogov A.Yu. Underwater Vehicle Thruster Parameters Evaluation Based on Motor Load Tests. Underwater investigation and robotics. 2022 No. 2(40). P. 4-12. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_40_02_01.
15. Evstegneeva A.S. Ispol'zovanie komp'juternoj programmy Advanced Grapher kak sredstvo realizacii principa nagljadnosti v processe obuchenija matematike. Molodoj uchenyj. 2018. No. 2. P. 108–112

About the author

KOSTENKO Vladimir Vladimirovich
Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Address: 690091, Russia, Vladivostok, Sukhanova st., 5a
Scientific interests: Underwater robotics, motion control systems, propulsion and steering systems, dynamic models, towed systems
Phone: +7 (984) 145-43-85
E-mail: kostenko@marine.febras.ru, kosten.ko@mail.ru
ORCID: 0000-0002-3821-3787