

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОДРУЛИВАЮЩЕГО ДВИЖИТЕЛЯ ДЛЯ РЕЖИМА ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ АНПА

В.В. Костенко, Н.А. Найденко, Р.П. Василенко

Возможность выполнения контактных операций необитаемыми подводными аппаратами (НПА), оборудованными многозвенным манипулятором (ММ), определяется точностью динамического позиционирования НПА над объектом работ в условиях возмущающих воздействий от течения, кабеля связи и манипулятора. Предложен новый подход к разработке и верификации математической модели подруливающего движителя (ПД) в режиме динамического позиционирования НПА, основанный на результатах экспериментальных исследований характеристик движителя и его электропривода. Определены статическая характеристика движителя, а также зависимость упора и момента сопротивления гребного винта от частоты вращения по результатам бассейновых испытаний ПД в швартовном режиме и нагрузочных испытаний его электропривода. Предложена математическая модель бесколлекторного гребного электропривода, основанная на модели коллекторного электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением, выполнена параметрическая идентификация этой модели по результатам нагрузочных испытаний. Приведена оценка экспериментальных и моделируемых реакций ПД на типовые варианты целевых упоров. Разработанная математическая модель ПД дает возможность для увеличения точности позиционирования НПА, а также точности моделирования реального поведения аппарата.

Ключевые слова: необитаемый подводный аппарат, динамическое позиционирование, подруливающий движитель, швартовные испытания, электропривод, нагрузочные испытания, математическая модель, верификация

Введение

Эффективность использования необитаемых подводных аппаратов (НПА), оборудованных многозвенным манипулятором (ММ), в значительной степени определяется способностью системы управления позиционировать аппарат над объектом работ с требуемой точностью [1–5]. Растущий объем теоретических и экспериментальных исследований показывает, что ключевым элементом усовершенствования систем управления движением подводных аппаратов является разработка динамических моделей движителей, которые обеспечивают динамическое позиционирование НПА при выполнении контактных операций [6–20].

Уточнение динамической модели движителя найдет применение в двух основных направлениях. Во-первых, использование точных моделей динами-

ки движителей в системах управления ПА с обратной связью дает возможность более точно управлять упором ПД в реальном времени и, следовательно, повысить быстроту и точность позиционирования аппарата. Во-вторых, использование точных моделей в компьютерном моделировании движения ПА поможет повысить точность моделирования реального поведения аппарата.

Целью работы является разработка методики исследования математической модели подруливающего движителя в режиме динамического позиционирования НПА, основанная на результатах бассейновых испытаний ПД и нагрузочных испытаний его электропривода. Достижение поставленной цели требует последовательного решения следующих задач: экспериментальное определение швартовных характеристик ПД, анализ результатов нагрузочных испытаний электропривода, определение параметров математи-

ческой модели гребного винта ПД, определение параметров математической модели электропривода по результатам его нагрузочных испытаний, верификация полученной математической модели ПД. Структура статьи включает аннотацию, введение, основную часть из четырех разделов и заключение.

В качестве предмета исследований был принят подруливающий двигатель ПД-24-60 разработки ИПМТ ДВО РАН, основные характеристики которого сведены в табл. 1, а внешний вид иллюстрирует рис. 1.

Таблица 1. Технические характеристики двигателя ПД-24-60

Характеристика	Значение
Тип электродвигателя	AT-Drive70
Габаритные размеры DxL, мм	180x200
Напряжение питания, В	25,9
Максимальная швартовная тяга, Н	±60
Диаметр гребного винта, мм	160



Рис. 1. Подруливающий двигатель ПД-24-60

Структура модели двигателя с управляемым по моменту бесколлекторным электроприводом показана на рис. 2, где приняты следующие обозначения: T_t – целевое значение упора, $N_c(T_t)$ – зависимость кода управления N_c от целевого значения упора, U_f – фазное напряжение электродвигателя, n_m – частота вращения электропривода, M_m – электродвижущий момент электропривода, M_{prop} – момент сопротивления гребного винта.

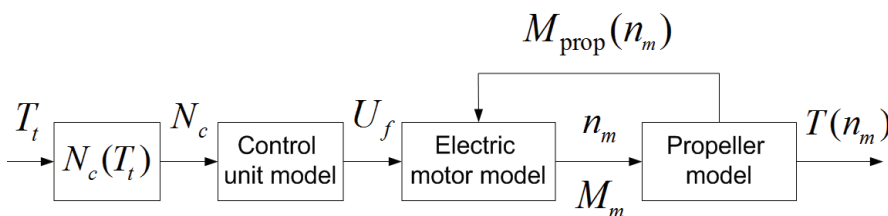


Рис. 2. Структура математической модели двигателя

1. Определение параметров модели гребного винта по результатам швартовных испытаний двигателя

Математическая модель ГВ определяется следующей зависимостью создаваемого упора T и момента сопротивления M_{prop} от частоты вращения [21–23]:

$$\begin{aligned}
 T &= K_t(\lambda) \rho g n_s |n_s| D^4, \\
 M_{prop} &= K_m(\lambda) \rho g n_s |n_s| D^5, \\
 \lambda &= V / (n_s D),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $K_t(\lambda)$ – коэффициент упора; $K_m(\lambda)$ – коэффициент момента; ρ – плотность воды, [кг/м³]; g – ускорение свободного падения, [м/с²]; D – диаметр, [м]; λ – относительная поступь гребного винта; n_s – частота вращения вала электропривода, [об/с]; V – скорость набегающего потока, вызванного движением аппарата, [м/с]. Поскольку разрабатываемая модель ПД используется для оценки режима динамического позиционирования аппарата без установившейся скорости набегающего потока, то можно принять $K_t(\lambda) = K_{t0}$, а $K_m(\lambda) = K_{m0}$. При этом модель (1) можно преобразовать к виду:

$$\begin{aligned}
 T &= K_T^0 n |n|, \\
 M_{prop} &= K_M^0 n |n|,
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где $K_T^0 = K_{t0} \rho g D^4$ – коэффициент упора, [Н/(об/мин)²]; $K_M^0 = K_{m0} \rho g D^5$ – коэффициент момента, [Nm/(об/мин)²]; n – частота вращения ГВ, [об/мин].

Оценка швартовных характеристик ПД проводилась в ходе бассейновых испытаний. Использованное при этом оборудование приведено на рис. 3. В результате испытаний было получено семейство переходных характеристик для кода управления из диапазона $-127 \leq N_c \leq +127$. На рис. 4 показана переходная характеристика ПД для кода управления +120.

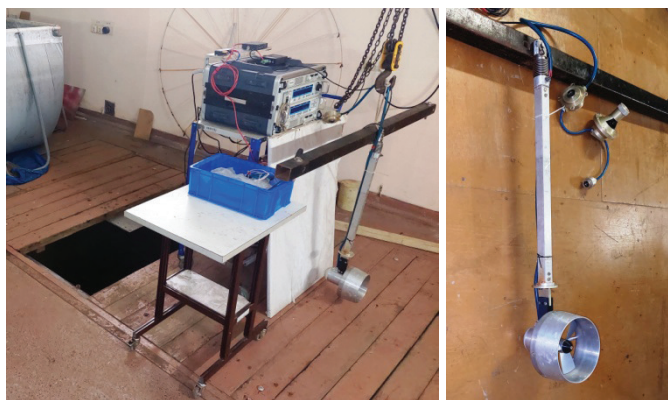


Рис. 3. Оборудование для швартовых испытаний ПД: а – стенд в сборе б – тензометрическая балка с ПД

Установившиеся значения параметров движителя, характеризующие статический режим работы, сведены в табл. 2 и иллюстрируются графиками рис. 4–8.

Таблица 2. Результаты швартовых испытаний движителя ПД-24-60

<i>N</i>	<i>T, N</i>	<i>n, об./мин</i>	<i>M_m, Nm</i>	<i>Mprop, Nm</i>
+127	56,4	1240	0,771	0,721
+120	51,7	1180	0,731	0,681
+110	45,2	1110	0,616	0,566
+100	38,9	1020	0,570	0,520
+90	32,6	935	0,496	0,446
+80	26,7	850	0,412	0,362
+70	20,7	760	0,325	0,275
+60	15,6	660	0,258	0,208
+50	11,1	560	0,195	0,145
+40	7,2	450	0,154	0,104
+30	3,8	335	0,107	0,057
+20	1,4	210	0,085	0,035
-20	-1,9	-220	-0,057	-0,007
-30	-4,2	-340	-0,082	-0,032
-40	-7,4	-450	-0,167	-0,117
-50	-11,1	-560	-0,186	-0,136
-60	-15,5	-660	-0,254	-0,204
-70	-20,5	-750	-0,339	-0,289
-80	-25,6	-850	-0,412	-0,362
-90	-31,7	-930	-0,488	-0,438
-100	-36,7	-1020	-0,549	-0,499
-110	-43,6	-1100	-0,655	-0,605
-120	-49,5	-1170	-0,744	-0,694
-127	-54,1	-1220	-0,809	-0,759

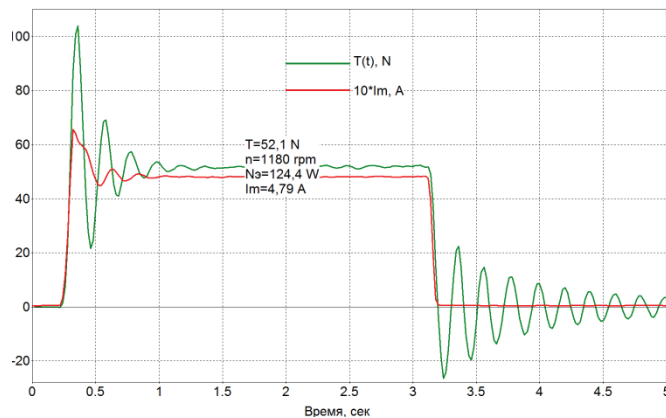


Рис. 4. Переходная характеристика ПД для кода управления +120

Для выявления зависимости момента сопротивления ГВ от частоты вращения использовались данные нагрузочных испытаний электропривода и испытаний движителя в бассейне. Момент сопротивления определялся в следующей последовательности:

- из результатов бассейновых испытаний выявляем установившуюся частоту вращения ГВ, соответствующую заданному значению кода управления;
- по экспериментальной механической характеристике электропривода, полученной в ходе нагрузочных испытаний для заданного кода управления, находим момент сопротивления ГВ (см. рис. 5).

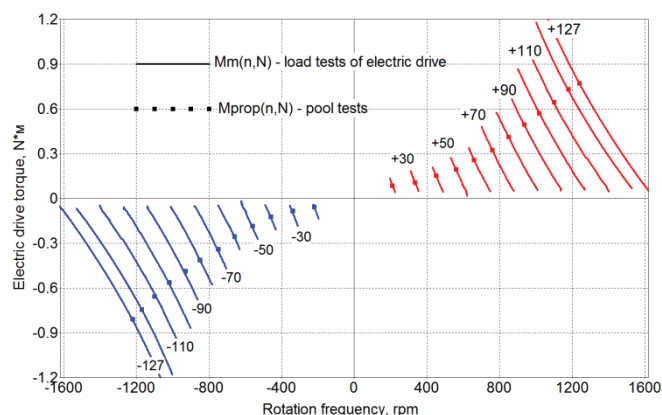


Рис. 5. Определение момента электропривода по результатам его нагрузочных испытаний

Выявленная в ходе бассейновых испытаний зависимость упора движителя и момента сопротивления его ГВ от частоты вращения приведены на рис. 6 и рис. 8, соответственно. На рис. 7 показана статическая характеристика движителя.

В ходе регрессионного анализа результатов бассейновых испытаний из табл. 2 с помощью про-

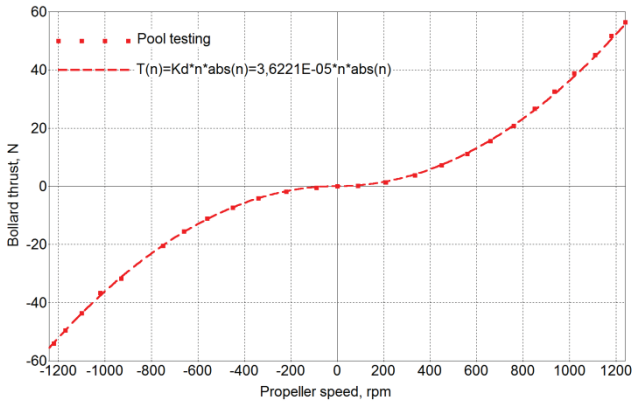


Рис. 6. Зависимость упора ГВ от частоты вращения

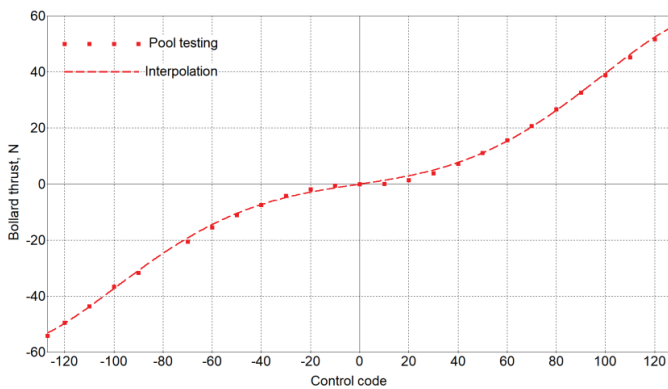


Fig. 7. Зависимость упора ГВ от кода управления

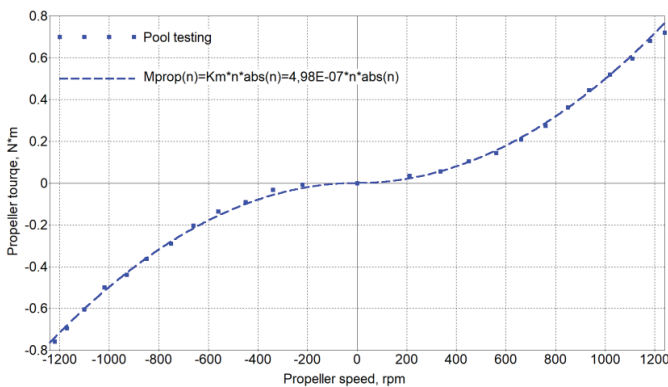


Рис. 8. Зависимость момента сопротивления ГВ от частоты вращения

граммы Advance Grapher [24] были определены численные значения коэффициентов упора и момента сопротивления ГВ, сведенные в табл. 3.

Таблица 3. Результат регрессионного анализа данных бассейновых испытаний

Характеристика	Значение
$K_T^0, N/(об/мин)^2$	$3,62 \cdot 10^{-5}$
$K_M^0, Nm/(об/мин)^2$	$4,98 \cdot 10^{-7}$

2. Определение параметров модели гребного электропривода по результатам нагрузочных испытаний

Привод ПД был реализован на базе бесколлекторного двигателя AT-Drive 70×18 производства НПО «Андроидная техника» [25]. За основу математической модели используемого электропривода была принята модель электродвигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов, структурная схема которой показана на рис. 9.

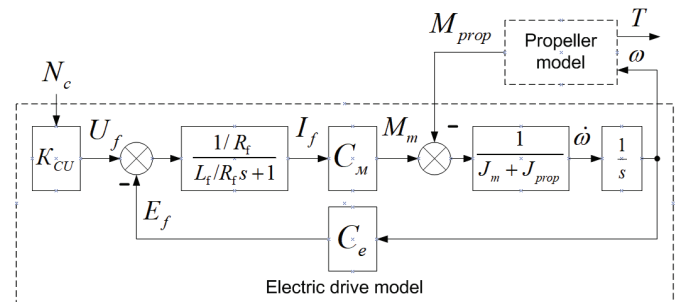


Рис. 9. Структура математической модели электропривода ПД

Для идентификации параметров приведенной выше математической модели электропривода проведены его нагрузочные испытания, в результате которых было получено семейство механических характеристик для кодов управления из диапазона $20 \leq Nc \leq 127$. Основу нагрузочного стенда составляют гистерезисный динамометр Magtrol HD-705-8NA-014, контроллер динамометра Magtrol DSP6001 и анализатор мощности Magtrol 6530. В процессе испытаний привод разгонялся до скорости холостого хода, соответствующей назначенному коду управления. Далее программное обеспечение стенда создает изменение момента нагрузки в заданном диапазоне и регистрирует частоту вращения, момент нагрузки, а также электрические параметры работы блока управления. Оборудование стенда показано на рис. 10, а полученные результаты иллюстрирую графики рис. 11–12.

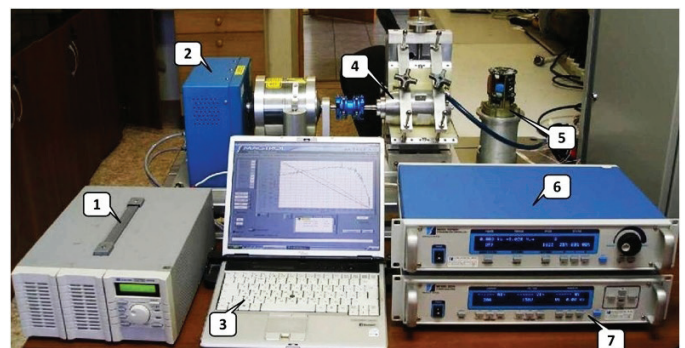


Рис. 10. Оборудование нагрузочного стенда

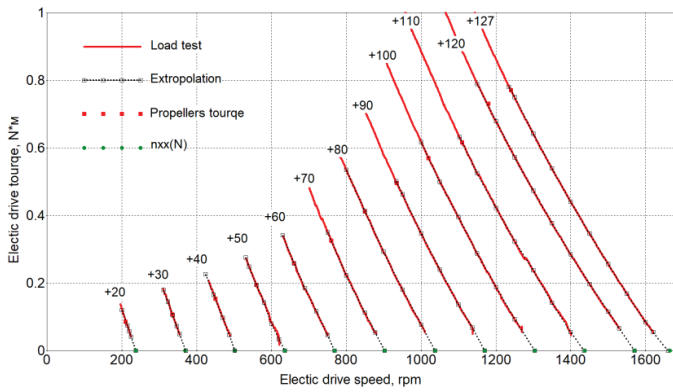


Fig. 11. Семейство механических характеристик электропривода ПД

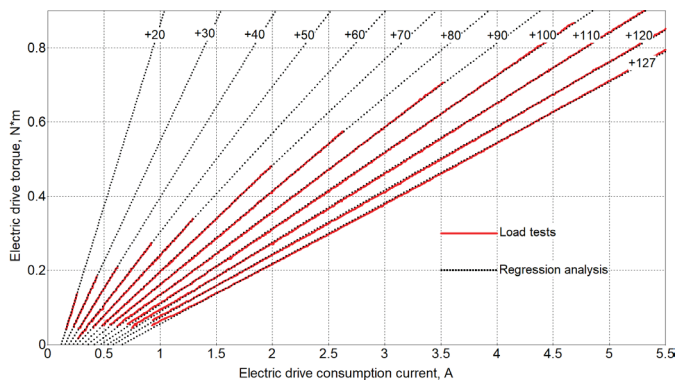


Fig. 12. Семейство зависимости момента электропривода от тока потребления

Для учета динамики электропривода была проведена серия дополнительных экспериментов, в ходе которых выполнялся разгон привода без момента нагрузки на валу на разных кодах управления и регистрировались данные о частоте вращения вала и потребляемом токе. Поиск параметров исходной модели двигателя постоянного тока (ДПТ), соответствующих бесколлекторному приводу AT-Drive 70x18, выполнялся с использованием инструмента параметрической идентификации Parameter Estimator в среде моделирования Matlab/Simulink [26, 27]. При этом в качестве алгоритма поиска параметров модели, соответствующих результатам эксперимента, используется нелинейный метод наименьших квадратов. Также стоит отметить, что в блоке управления электропривода испытуемого ПД реализовано ограничение скорости

нарастания кода управления N_c , которое ограничивает фазный ток и ток потребления в переходных процессах двигателя. Для учета этой особенности блока управления в модель ДПТ был добавлен модуль Rate Limiter, ограничивающий скорость нарастания входного сигнала в соответствии с внутренним настроечным коэффициентом. Структура модели электропривода, учитывающая влияние кода управления на ее параметры приведена на рис. 13.

В ходе обработки экспериментальных данных нагрузочных испытаний, а также переходных процессов разгона привода средствами параметрической идентификации Parameter Estimator в среде моделирования Matlab/Simulink были определены параметры принятой модели электродвигателя постоянного тока, приведенные в табл. 4. В таблице приняты следующие обозначения: R_f , L_f – активное сопротивление и индуктивность фазы ДПТ; V_f – фазное напряжение; J_m , J_{prop} – момент инерции ротора электропривода и гребного винта, соответственно; K_{CU} – коэффициент усиления блока управления двигателем; K_L – коэффициент, задающий ограничение абсолютной величины первой производной входного кода управления N_c . При идентификации учитывалось совпадение результатов работы модели и экспериментальных данных по частоте вращения, а также по потребляемому току.

По результатам нагрузочных испытаний электропривода с помощью средств параметрической идентификации Parameter Estimator среды моделирования Matlab/Simulink были определены величины коэф-

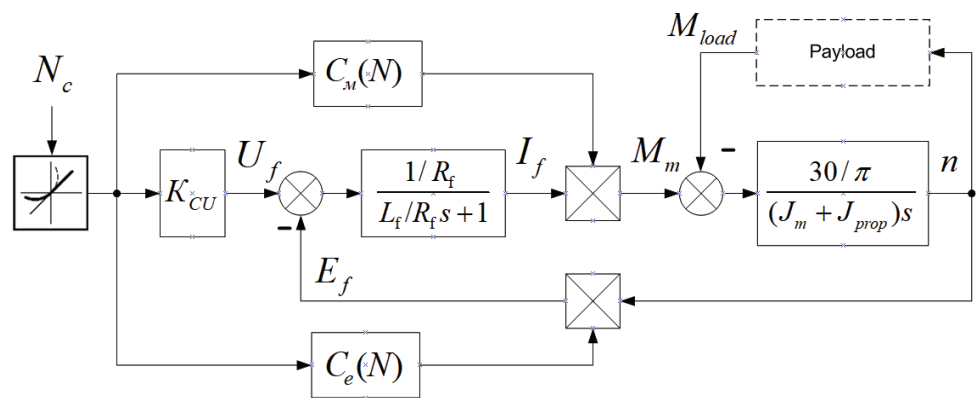


Рис. 13. Уточненная по результатам нагрузочных испытаний структура модели электропривода ПД

Таблица 4. Параметры модели электропривода

R_f	L_f		J_B	K_{CU}	V_f	K_L
Ом	Гн	кг/м ²	кг/м ²	V	V	–
1,22	$9,7 \cdot 10^{-3}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	0,204	25,9	130

коэффициентов момента C_M и противо-ЭДС C_e для кодов управления из диапазона $20 \leq N_c \leq 127$. В ходе регрессионного анализа полученных результатов, представленных на рис. 14, были определены следующие зависимости этих коэффициентов от кода управления:

$$C_e(N_c) = a_{e7}N_c^7 + a_{e6}N_c^6 + \dots + a_{e1}N_c + a_{e0} \quad (3)$$

$$C_M(N_c) = a_{m5}N_c^5 + a_{m4}N_c^4 + \dots + a_{m1}N_c + a_{m0}, \quad (4)$$

где a_{ei} – постоянные коэффициенты зависимости $C_e(N_c)$ ($i=0..7$), a_{mj} – постоянные коэффициенты ($j=0..5$) зависимости $C_M(N_c)$. Численные значения этих коэффициентов сведены в табл. 5.

Таблица 5. Коэффициенты интерполирующих полиномов $C_e(N_c)$ и $C_M(N_c)$

$C_e(N_c)$		$C_M(N_c)$	
a_{e7}	1,519e-14	–	–
a_{e6}	-7,533e-12	–	–
a_{e5}	1,508e-09	a_{m5}	9,306e-11
a_{e4}	-1,553e-07	a_{m4}	-3,304e-11
a_{e3}	8,610e-06	a_{m3}	4,250e-06
a_{e2}	-0,00024	a_{m2}	-0,0002
a_{e1}	0,00225	a_{m1}	0,0051
a_{e0}	0,16580	a_{m0}	0,1731

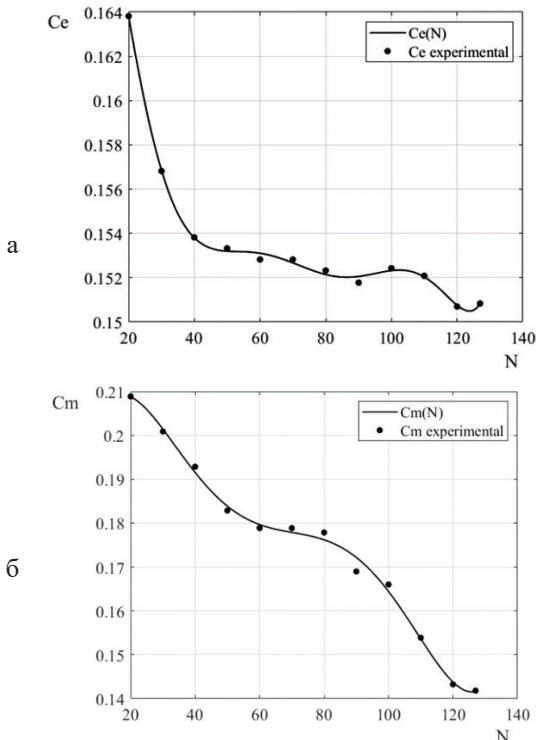


Рис. 14. Аппроксимация интерполирующими полиномами зависимости: а – $C_e(N_c)$, б – $C_M(N_c)$

Результаты нагрузочных испытаний для кодов управления в диапазоне от 20 до 127, а также механические характеристики электропривода, построенные с учетом зависимостей (3) и (4), представлены на рис. 15.

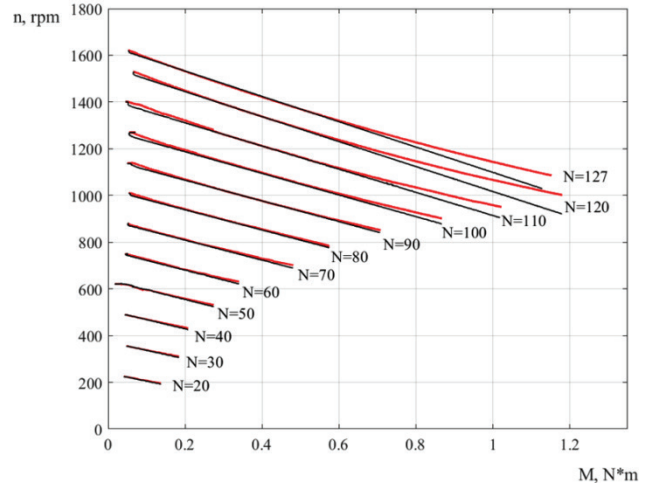


Рис. 15. Семейство экспериментальных и аппроксимированных механических характеристик электропривода AT-drive 70x18

Анализ графиков этого рисунка показывает, что аппроксимированные механические характеристики достаточно точно совпадают с экспериментальными на тех участках, в пределах которых лежит возможное моментное воздействие гребного винта на вал электропривода.

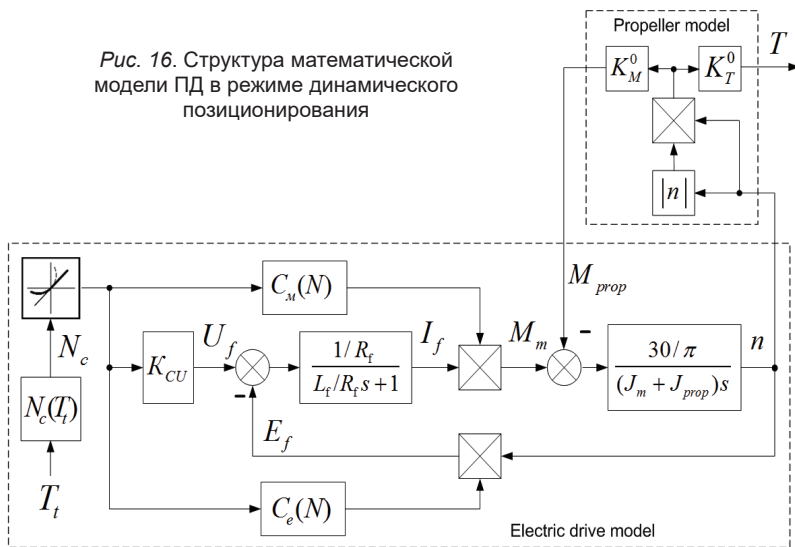
3. Верификация разработанной математической модели подруливающего двигателя в режиме динамического позиционирования НПА

С учетом разработанных выше моделей гребного винта и гребного электропривода можно представить итоговую математическую модель ПД, структура которой показана на рис. 16.

Для формирования кода управления N_c , соответствующего целевому упору T_r , в структуру модели ПД введен дополнительный функциональный блок, реализующий обратную статическую характеристику двигателя $N_c(T_r)$, график которой приведен на рис. 17. Регрессионный анализ данных бассейновых испытаний выявил аналитическую форму этой функции (5).

$$N_c = \begin{cases} A_{T3}T_r^3 + A_{T2}T_r^2 + A_{T1}T_r + A_{T0}, & \text{if } T_r \geq 1,0 \text{ N;} \\ 0, & \text{if } |T_r| < 1,0 \text{ N;} \\ B_{T3}T_r^3 + B_{T2}T_r^2 + B_{T1}T_r + B_{T0}, & \text{if } T_r \leq -1,0 \text{ N,} \end{cases} \quad (5)$$

Рис. 16. Структура математической модели ПД в режиме динамического позиционирования



где A_{Ti} , B_{Ti} – коэффициенты интерполирующих полиномов, численные значения которых сведены в табл. 6.

Таблица 6. Коэффициенты интерполирующих полиномов $N_c(T_t)$

A_{T3}	$6,23 \cdot 10^{-4}$	B_{T3}	$6,57 \cdot 10^{-4}$
A_{T2}	$-6,96 \cdot 10^{-2}$	B_{T2}	$7,21 \cdot 10^{-2}$
A_{T1}	3,99	B_{T1}	4,14
A_{T0}	12,9	B_{T0}	-11,3

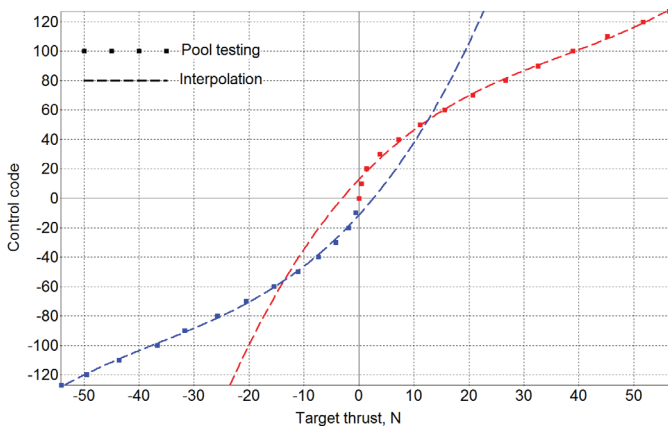


Рис. 17. Зависимость кода управления от целевого значения упора ПД

Таблица 7. Сравнение модели двигателя с экспериментальными данными

N_c	t_{TP} , sec		n , rpm		T , N	
	Real	Model	Real	Model	Real	Model
10	0,131	0,130	93	98	0,01	0,03
20	0,140	0,143	210	209	1,33	1,22
30	0,171	0,167	336	332	3,82	3,81
40	0,176	0,179	450	448	7,21	7,21
50	0,190	0,186	558	553	11,39	11,11
60	0,197	0,190	660	653	16,01	15,62
70	0,201	0,193	759	752	21,19	20,63
80	0,215	0,200	852	849	26,78	26,32
90	0,215	0,203	941	940	32,55	32,31
100	0,221	0,211	1026	1023	38,56	38,31
110	0,231	0,223	1106	1100	45,11	44,38
120	0,241	0,241	1183	1178	51,70	50,98
127	0,242	0,241	1234	1234	56,25	55,96

На первом этапе проверки проводилась оценка качества разработанной модели двигателя при обработке ступенчатой подачи управляющего кода из диапазона от 10 до 127 в ходе бассейновых испытаний. Сравнение работы модели ПД с результатами эксперимента проводилось по времени переходного процесса t_{TP} , частоте вращения n и упору T . Результаты приведены в табл. 7.

Для верификации модели в динамическом режиме была проведена серия экспериментов, в ходе которых на двигатель и модель подавался изменяющийся во времени целевой упор. Измеренный тензометрической балкой упор двигателя и реакция модели синхронно регистрировались. На рис. 18 приведены реакции двигателя и его модели на синусоидальный код управления следующего вида:

$$N_c(t) = 127 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}t\right). \quad (6)$$

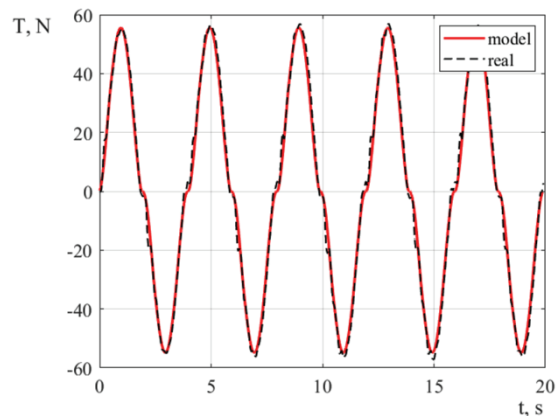


Рис. 18. Реакция модели и двигателя на синусоидальный сигнал управления (6)

Анализ графиков рис. 18 показывает, что на изменение упора двигателя существенное влияние оказывает упругость тензометрической балки, вызывающая ее колебательность при реверсах управляющего кода и упора. До затухания этих колебаний отклонения результатов моделирования от измеренного упора

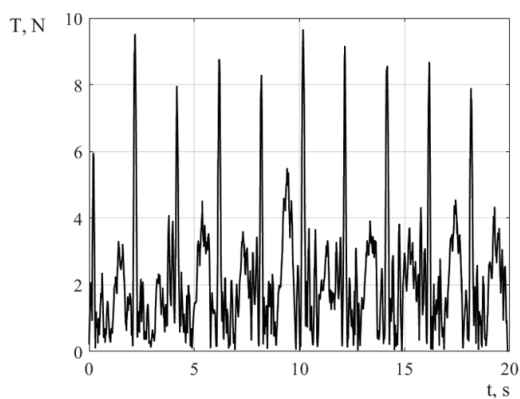


Рис. 19. Ошибка формирования упора для синусоидального сигнала управления

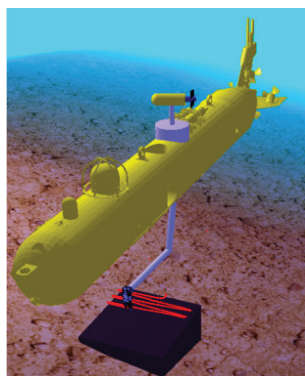


Рис. 20. Выполнение контактной операции АНПА с манипулятором

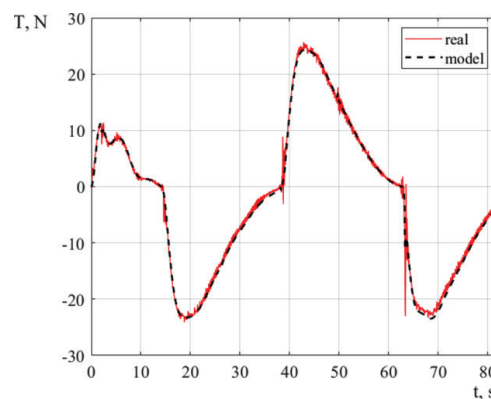


Рис. 21. Реакция модели и двигателя в режиме контактной операции АНПА с манипулятором

ра имеют максимальное значение (рис. 19). При этом среднее отклонение измеренного упора от моделируемого не превышает 1,95 Н.

Безусловный интерес представляет оценка реакции модели двигателя на целевой упор, формируемый моделью АНПА с манипулятором, выполняющим рабочим органом траекторию, приведенную на рис. 20. При этом исследуемый двигатель стабилизирует положение аппарата и рабочего органа, парируя возмущения от его контакта с обрабатываемой поверхностью.

В результате обработки сигнала управления, компенсирующего действующие на АНПА возмущения от контактной операции, реальный двигатель и его модель формировали упоры, приведенные на рис. 21.

Ошибка формирования упора двигателя для описываемого эксперимента (рис. 20, 21) приведена на рис. 22. Средняя величина отклонения измеренного упора от модельного составила 0,46 Н.

Можно заметить, что точность формирования упора модели относительно реального двигателя существенно выше для эксперимента с контактной

операцией (рис. 22) в сравнении с экспериментом, когда на двигатель подавался синусоидальный сигнал управления (6). Объяснить это можно тем, что скорость изменения синусоидального управляющего сигнала существенно выше, в результате чего собственные колебания тензометрической балки вносят больше погрешности в измерения.

Заключение

Анализ результатов проведенного исследования позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Предложен новый подход к определению математической модели подруливающего двигателя для режима динамического позиционирования, основанный на результатах бассейновых испытаний и результатах нагрузочных испытаний его электропривода.
2. Разработана методика определения параметров модели гребного винта по результатам бассейновых испытаний подруливающего двигателя в швартовном режиме. Определены статическая характеристика двигателя, а также зависимости его упора и момента сопротивления ГВ от частоты вращения.
3. Разработана методика параметрической идентификации модели бесколлекторного электропривода по результатам его нагрузочных испытаний. Принятая для идентификации модель основана на традиционной модели коллекторного электродвигателя с параметрами, зависящими от кода управления.
4. Проведена верификация разработанной модели двигателя для трех вариантов управляющего сигнала: ступенчатого, синусоидального и компенсирующего возмущения от контактной работы манипулятора АНПА.
5. Среднее отклонение модельного упора двигателя от измеренного значения для ступенчатого управляющего сигнала не превышает 0,5 Н, для си-

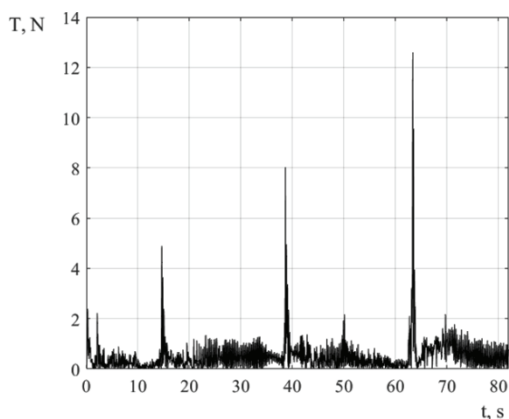


Рис. 22. Ошибка формирования упора при компенсации возмущений от контактной операции АНПА с манипулятором

нусоидального – 1,95 Н, а для режима компенсации возмущений от работы манипулятора – 0,46 Н.

6. Для увеличения точности измерения упора движителя в ходе бассейновых испытаний необходимо увеличить жесткость тензометрической балки.

7. Разработанная математическая модель движителя будет использоваться не только для моделирования движения НПА, но и для синтеза алгоритмов управления динамическим позиционированием ап-

парата при проведении контактных операций с донными объектами.

Работа выполнена по теме государственного задания ИМТП ДВО РАН «Исследование и разработка принципов и методов создания многофункциональных робототехнических комплексов для изучения и освоения Мирового океана», № государственной регистрации 121030400088-1»

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Konoplin A., Krasavin N., Vasilenko R. Stabilization system of AUV for implementation of contact manipulation operations // 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE, 2023. P. 335–339.
2. Konoplin A. et al. Development of a Control System for Underwater Vehicles with Multilink Manipulators Performing Contact Manipulation Operations // Journal of Marine Science and Engineering. 2024. Vol. 12, No. 7. P. 1126.
3. Ishitsuka M., Ishii K. Control of an underwater manipulator mounted for an AUV considering dynamic manipulability // International Congress Series. Elsevier, 2006. Vol. 1291. P. 269–272.
4. Konoplin A. et al. Development of a control system for multilink manipulators on unmanned underwater vehicles dynamically positioned over seafloor objects // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, No. 3. P. 1666.
5. Huang H. et al. Vehicle-manipulator system dynamic modeling and control for underwater autonomous manipulation // Multibody System Dynamics. 2017. Vol. 41. P. 125–147.
6. Yoerger D.R., Cooke J.G., Slotine J.J.E. The influence of thruster dynamics on underwater vehicle behavior and their incorporation into control system design // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1990. Vol. 15, No. 3. P. 167–178.
7. Healey A.J. et al. Toward an improved understanding of thruster dynamics for underwater vehicles // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1995. Vol. 20, No. 4. P. 354–361.
8. Whitcomb L.L., Yoerger D.R. Preliminary experiments in model-based thruster control for underwater vehicle positioning // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1999. Vol. 24, No. 4. P. 495–506.
9. Kim J., Chung W.K. Accurate and practical thruster modeling for underwater vehicles // Ocean Engineering. 2006. Vol. 33, No. 5–6. P. 566–586.
10. Sørensen A.J., Smogeli Ø.N. Torque and power control of electrically driven marine propellers // Control Engineering Practice. 2009. Vol. 17, No. 9. P. 1053–1064.
11. Bryant A. Development of an empirical propeller thrust model using experimental measurements and computational fluid dynamics. 2020.
12. Smallwood D.A., Whitcomb L.L. Model-based dynamic positioning of underwater robotic vehicles: theory and experiment // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2004. Vol. 29, No. 1. P. 169–186.
13. Blanke M., Lindgaard K.P., Fossen T.I. Dynamic model for thrust generation of marine propellers // IFAC Proceedings Volumes. 2000. Vol. 33, No. 21. P. 353–358.
14. Boehm J. et al. Characterization, modeling, and simulation of an ROV thruster using a six degree-of-freedom load cell // OCEANS 2018. Charleston: IEEE, 2018. P. 1–7.
15. Boehm J. et al. Tracking performance of model-based thruster control of a remotely operated underwater vehicle // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2020. Vol. 46, No. 2. P. 389–401.
16. Bulten N., Suijkerbuijk R. Full scale thruster performance and load determination based on numerical simulations // Proceedings of 3rd International Symposium on Marine Propulsors, Tasmania, Australia. 2013. P. 501–509.
17. Ali A.F., Arshad M.R. Seabotix Thruster Modeling for a Remotely Operated Vehicle (ROV) // 10th International Conference on Robotics, Vision, Signal Processing and Power Applications: Enabling Research and Innovation Towards Sustainability. Singapore: Springer, 2019. P. 465–471.
18. Liu B. et al. Experimental Validation of the Optimal Dynamic Positioning Control for Work-Class Remote Operated Vehicle // International Conference on Marine Equipment & Technology and Sustainable Development. Singapore : Springer Nature Singapore, 2023. P. 406–420.
19. Aras M.S.M. et al. Thruster modelling for underwater vehicle using system identification method // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2013. Vol. 10, No. 5. P. 252.
20. Guo C., Ye L., Weng K. Review of Theory and Experiment for Underwater Propulsion // International Conference on Marine Equipment & Technology and Sustainable Development. Singapore : Springer Nature Singapore, 2023. P. 727–752.
21. Войткунский Я.И., Першиц Р.Я., Титов И.А. Справочник по теории корабля. Л.: Судпромгиз, 1960. 688 с.
22. Басин А.М., Миниович И.Я. Теория и расчет гребных винтов. Л. Судостроение, 1963. 766 с.
23. Гофман А.Д. Движительно рулевой комплекс и маневрирование судна. Справочник. Л.: Судостроение, 1988. 360 с.
24. Евстегнеева А. С. Использование компьютерной программы Advanced Grapher как средство реализации принципа наглядности в процессе обучения математике // Молодой ученый. 2018. № 2. С. 108–112.
25. <https://npo-at.com/production/at-drive/> Link to the website of NPO Android Technologies.
26. Синуков, А. В. Разработка модели двигателя постоянного тока, эквивалентной реальному объекту, в программном комплексе MATLAB // Научные исследования и разработки в машиностроении, энергетике и управлении: материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Гомель, 2019. С. 585–587.
27. Сенцов, Е. В. Применение программного пакета MATLAB Simulink в рамках исследования различных систем электропривода / Е.В. Сенцов, П.Н. Левин // Автоматизация и информатика. Тенденции развития современной науки : материалы науч. конф. студентов и аспирантов / Липец. гос. техн. ун-т. Липецк, 2018. С. 146–158.

Об авторах

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. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук

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

Научные интересы: подводная робототехника, системы управления движением автономных и телеуправляемых подводных роботов, движительно-рулевые комплексы, динамические модели, подводные привязные системы.

Тел.: +7 (423) 243-24-16

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

SPIN-код: 2310-3141

ORCID: 0000-0002-3821-3787

Resercher ID: AAF-6399-2021

Scopus ID: 57189036440

НАЙДЕНКО Николай Александрович, научный сотрудник лаборатории исполнительных устройств и систем телеуправления

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

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

Научные интересы: теория и практика создания движительно-рулевых комплексов и систем энергообеспечения автономных, телеуправляемых и гибридных подводных роботов

Тел.: +7 (951) 007-65-96

Е-mail: nna0502@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5685-1838

ВАСИЛЕНКО Роман Павлович, младший научный сотрудник лаборатории подводных манипуляционных комплексов

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

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

Научные интересы: автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, адаптивное управление, информационно-управляющие системы

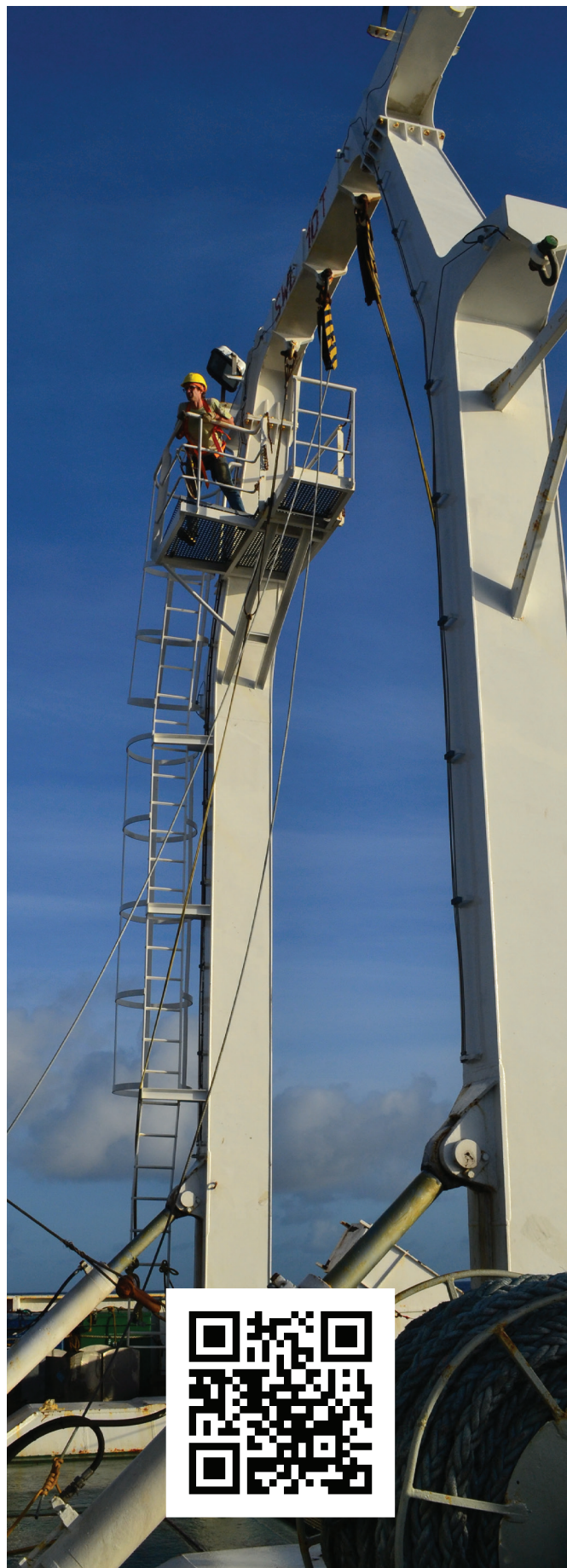
Тел. (раб.): +7(902) 064-43-21

Е-mail: vrp261200@mail.ru

ORCID: 0009-0005-4939-2281

Для цитирования:

Костенко В.В., Найденко Н.А., Василенко Р.П. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОДРУЛИВАЮЩЕГО ДВИЖИТЕЛЯ ДЛЯ РЕЖИМА ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2024. № 4 (50). С. 55–66. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_50_04_06. EDN: OWKVNB.



DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF A THRUSTER FOR THE DYNAMIC POSITIONING MODE OF AN UNDERWATER VEHICLE

V.V. Kostenko, N.A. Naidenko, R. P. Vasilenko

The ability to perform contact operations by uninhabited underwater vehicles (UUVs) equipped with a multi-link manipulator (MM) is determined by the accuracy of dynamic positioning of the UUV over the object of work in the conditions of disturbing influences from the currents, communication cable and manipulator. A new approach to the development and verification of the steering thruster (ST) mathematical model in the dynamic positioning mode of the UUV based on the results of experimental studies of the thruster characteristics and its electric drive is proposed. The static characteristic of the thruster, as well as the dependence of the propeller thrust and drag torque on the rotational speed were determined based on the results of basin tests of the ST in the mooring mode and load tests of its electric drive. A mathematical model of a brushless rowing electric drive based on the model of a brushed DC motor with independent excitation is proposed, and parametric identification of this model based on the results of load tests is performed. An evaluation of experimental and simulated ST responses to typical variants of target stops is presented. The developed mathematical model of ST provides an opportunity for increasing the accuracy of UUV positioning, as well as the accuracy of modeling the real behavior of the underwater vehicle.

Keyword: uninhabited underwater vehicle, dynamic positioning, steering thruster, mooring tests, electric drive, load tests, mathematical model, verification.

Reference

- Konoplin A., Krasavin N., Vasilenko R. Stabilization system of AUV for implementation of contact manipulation operations 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE, 2023. P. 335–339.
- Konoplin A. et al. Development of a Control System for Underwater Vehicles with Multilink Manipulators Performing Contact Manipulation Operations. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 7. P. 1126.
- Ishitsuka M., Ishii K. Control of an underwater manipulator mounted for an AUV considering dynamic manipulability. *International Congress Series*. Elsevier, 2006. Vol. 1291. P. 269–272.
- Konoplin A. et al. Development of a control system for multilink manipulators on unmanned underwater vehicles dynamically positioned over seafloor objects. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No. 3. P. 1666.
- Huang H. et al. Vehicle-manipulator system dynamic modeling and control for underwater autonomous manipulation. *Multibody System Dynamics*. 2017. Vol. 41. P. 125–147.
- Yoerger D.R., Cooke J.G., Slotine J.J.E. The influence of thruster dynamics on underwater vehicle behavior and their incorporation into control system design. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1990. Vol. 15, No. 3. P. 167–178.
- Healey A.J. et al. Toward an improved understanding of thruster dynamics for underwater vehicles. *IEEE Journal of oceanic Engineering*. 1995. Vol. 20, No. 4. P. 354–361.
- Whitcomb L.L., Yoerger D.R. Preliminary experiments in model-based thruster control for underwater vehicle positioning. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1999. Vol. 24, No. 4. P. 495–506.
- Kim J., Chung W.K. Accurate and practical thruster modeling for underwater vehicles. *Ocean Engineering*. 2006. Vol. 33, No. 5–6. P. 566–586.
- Sørensen A.J., Smogeli Ø.N. Torque and power control of electrically driven marine propellers. *Control Engineering Practice*. 2009. Vol. 17, No. 9. P. 1053–1064.
- Bryant A. Development of an empirical propeller thrust model using experimental measurements and computational fluid dynamics. 2020.
- Smallwood D.A., Whitcomb L.L. Model-based dynamic positioning of underwater robotic vehicles: theory and experiment. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2004. Vol. 29, No. 1. P. 169–186.
- Blanke M., Lindegaard K.P., Fossen T.I. Dynamic model for thrust generation of marine propellers. *IFAC Proceedings Volumes*. 2000. Vol. 33, No. 21. P. 353–358.
- Boehm J. et al. Characterization, modeling, and simulation of an ROV thruster using a six degree-of-freedom load cell. *OCEANS 2018*. Charleston: IEEE, 2018. P. 1–7.
- Boehm J. et al. Tracking performance of model-based thruster control of a remotely operated underwater vehicle. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2020. Vol. 46, No. 2. P. 389–401.
- Bulten N., Suijkerbuijk R. Full scale thruster performance and load determination based on numerical simulations. *Proceedings of 3rd International Symposium on Marine Propulsors*, Tasmania, Australia. 2013. P. 501–509.
- Ali A.F., Arshad M.R. Seabotix Thruster Modeling for a Remotely Operated Vehicle (ROV). *10th International Conference on Robotics, Vision, Signal Processing and Power Applications: Enabling Research and Innovation Towards Sustainability*. Singapore: Springer, 2019. P. 465–471.
- Liu B. et al. Experimental Validation of the Optimal Dynamic Positioning Control for Work-Class Remote Operated Vehicle. *International Conference on Marine Equipment & Technology and Sustainable Development*. Singapore : Springer Nature Singapore, 2023. P. 406–420.

19. Aras M.S.M. et al. Thruster modelling for underwater vehicle using system identification method. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2013. Vol. 10, No. 5. P. 252.

20. Guo C., Ye L., Weng K. Review of Theory and Experiment for Underwater Propulsion. *International Conference on Marine Equipment & Technology and Sustainable Development*. Singapore : Springer Nature Singapore, 2023. P. 727–752.

21. Vojtkunskij Ja.I., Pershic R.Ja., Titov I.A. *Spravochnik po teorii korablja*. L.: Sudpromgiz, 1960. 688 p. (In Russ.).

22. Basin A.M., Miniovich I.Ja. *Teorija i raschet grebnyh vintov*. L. Sudstroenie, 1963. 766 p. (In Russ.).

23. Gofman A.D. *Dvizhitel'no rulevoj kompleks i manevrirovanie sudna*. *Spravochnik*. L.: Sudostroenie, 1988. 360 p. (In Russ.).

24. Evstegneeva A. S. Ispol'zovanie komp'yuternoj programmy Advanced Grapher kak sredstvo realizacii principa nagljadnosti v processe obuchenija matematike. *Molodoy uchenyj*. 2018. No. 2. P. 108–112. (In Russ.).

25. <https://npo-at.com/production/at-drive/> Link to the website of NPO Android Technologies.

26. Sinjukov, A. V. Razrabotka modeli dvigatelja postojannogo toka, jekvivalentnoj real'nomu ob#ektu, v programmnom komplekse MATLAB. *Nauchnye issledovanija i razrabotki v mashinostroenii, jenergetike i upravlenii: materialy XIX Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh*. Gomel', 2019. P. 585–587. (In Russ.).

27. Sencov, E. V. Primenenie programmno paketa MATLAB Simulink v ramkah issledovanija razlichnyh sistem jelektroprivoda. E. V. Sencov, P. N. Levin. *Avtomatizacija i informatika. Tendencii razvitija sovremennoj nauki : materialy nauch. konf. studentov i aspirantov*. Lipec. gos. tehn. un-t. Lipeck, 2018. P. 146–158. (In Russ.).

Recommended citation:

Kostenko V.V., Naidenko N.A., Vasilenko R.P. DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF A THRUSTER FOR THE DYNAMIC POSITIONING MODE OF AN UNDERWATER VEHICLE. *Underwater investigations and robotics*. 2024. No. 4 (50). P. 55–66. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_50_04_06. EDN: OWKVHB.

Information about the authors

KOSTENKO Vladimir Vladimirovich, Ph.D., leading researcher, head laboratory of actuating devices and remote control system, Federal State Budgetary Institution of Science M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems Far East Branch Russian Academy of Sciences

Address: 5a, Sukhanov St., Vladivostok, 690950

Research interests: underwater robotics, motion control systems for autonomous and remote-controlled underwater robots, propulsion and steering systems, dynamic models, underwater tethering systems.

Phone: +7 (423) 243-24-16

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

SPIN-код: 2310-3141

ORCID: 0000-0002-3821-3787

Resercher ID: AAF-6399-2021

Scopus ID: 57189036440

NAIDENKO Nikolay Alexandrovich, research associate laboratory of actuation devices and remote control systems Federal State Budgetary Institution of Science M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems Far East Branch Russian Academy of Sciences

Address: 5a, Sukhanov St., Vladivostok, 690950

Research interests: theory and practice of creating propulsion and steering systems and power supply systems for autonomous, remotely controlled and hybrid underwater robots

Phone: +7 (951) 007-65-96

E-mail: nna0502@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5685-1838

VASILENKO Roman Pavlovich, junior research scientist of underwater manipulation complex laboratory, Federal State Budgetary Institution of Science M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems Far East Branch Russian Academy of Sciences

Address: 5a, Sukhanov Str., Vladivostok, 690950

Research interests: automatic control of underwater robots and manipulators, adaptive control, information and control systems

Phone: +7(902) 064-43-21

E-mail: vrp261200@mail.ru

ORCID: 0009-0005-4939-2281

