

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК МАРШЕВОГО ДВИЖИТЕЛЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАГРУЗОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В.В. Костенко, А.Ю. Толстоногов

Рассматривается имитационная динамическая модель маршевого движителя подводного аппарата, предназначенная для определения его эксплуатационных характеристик по результатам нагрузочных испытаний, заданному коду управления и измеренной частоте вращения вала гребного электропривода. В основу модели положено вычисление крутящего момента по известной частоте вращения вала электропривода в установившемся режиме движения аппарата с постоянной скоростью. Для вычисления крутящего момента и тяги используется математическая модель маршевого движителя, основанная на результатах нагрузочных испытаний его электропривода и аналитических выражениях кривых действия гребного винта. Приводятся результаты идентификации параметров математической модели электропривода, полученные путем анализа семейства экспериментальных механических характеристик с учетом диапазона изменения управляющих кодов и зависимости момента гребного винта от частоты вращения и скорости набегающего потока. Дается оценка погрешности модельного вычисления момента в сравнении с результатами нагрузочных испытаний. Результаты вычислительных экспериментов используются для определения характеристик маршевого движителя АНПА «ММТ-300» разработки ИГМТ ДВО РАН. В перспективе предложенная модель позволяет определять в реальном масштабе времени не только момент гребного винта и тягу маршевого движителя, но и его относительную поступь, скорость набегающего потока, позиционные гидродинамические характеристики подводного аппарата.

Ключевые слова: тяга маршевого движителя, момент сопротивления гребного винта, нагрузочные испытания электропривода, кривые действия гребного винта, относительная поступь, скорость набегающего потока.

Введение

Наиболее перспективным техническим средством выполнения обзорно-поисковых и инспекционных работ под водой без ограничения глубины погружения является автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА) [1–7]. Эффективность использования АНПА во многом зависит от точности его движения по заданной траектории, которая в значительной степени определяется управляющими воздействиями движительной системы. При этом важно обеспечить адаптивное к скорости хода аппарата распределение управляющих воздействий на маршевые движители (МД), которое требует адекватной оценки реальной тяги и момента сопротивления гребного

винта (ГВ) [8, 9]. Кроме того, при известной тяге МД можно оценить гидродинамическое сопротивление аппарата, а по моменту нагрузки гребного электропривода (ГЭП) – относительную поступь ГВ и скорость набегающего потока. В ранее опубликованных исследованиях установившаяся тяга МД и момент нагрузки для привода определялись в соответствии с кривыми действия ГВ по измеренным значениям его частоты вращения и скорости движения аппарата относительно воды [10–14]. Цель настоящей работы состоит в определении эффективной оценки основных характеристик маршевого движителя в режиме установившегося движения АНПА. В данной постановке необходимо последовательное решение следующих задач:

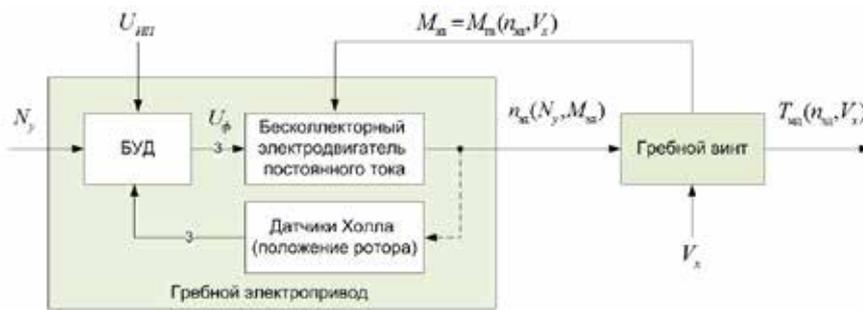


Рис. 1. Структурная схема модели маршевого движителя в установившемся режиме работы

- определение математической модели маршевого движителя;
- определение математической модели гребного электропривода и уточнение ее параметров по результатам нагрузочных испытаний;
- расчет относительной поступи гребного винта по измеренной частоте вращения и вычисленному крутящему моменту электропривода;
- оценка точности расчета тяги маршевого движителя и скорости набегающего потока.

1. Математическая модель маршевого движителя в установившемся режиме

Характеристики маршевого движителя определяются взаимодействием электропривода с гребным винтом (ГВ), который создает нагрузочный момент на валу в соответствии с частотой вращения и скоростью аппарата. Структурная схема модели МД с электродвигателем (ЭД), управляемым по моменту [14], приведена на рис. 1. На схеме приняты следующие обозначения: N_y – код управления, определяющий амплитудное значение фазных напряжений и электродвижущий момент ЭД; $U_{шт}$ – напряжение питания блока управления двигателем (БУД); U_ϕ – фазные напряжения ЭД; $n_{эл}$ – частота вращения вала ЭД; $M_{эл}$, $M_{ГВ}$ – крутящий момент ЭД и момент сопротивления ГВ соответственно; $T_{мд}$ – тяга движителя; V_x – ско-

рость поступательного движения аппарата, соответствующая скорости набегающего потока.

В установившемся режиме скорость движения АНПА зависит от суммарной тяги маршевых движителей и гидродинамического сопротивления корпуса аппарата. При этом частота вращения вала управляемого по моменту электропривода каждого МД будет определяться равенством крутящего момента ЭД и момента сопротивления ГВ. В таком режиме работы с постоянным значением частоты вращения и скорости набегающего потока V_x математическую модель ГВ определяют следующие зависимости [10–12]:

$$T_{мд} = K_T(\lambda) \rho n_s^2 D^4 g,$$

$$M_{ГВ} = K_M(\lambda) \rho n_s^2 D^5 g; \quad (1)$$

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

В качестве объекта исследований принят МД АНПА «ММТ-300» разработки ИПМТ ДВО (рис. 2) на базе синхронного бесколлекторного электродвигателя с постоянными магнитами AT-Drive 50x14 производства АО ПК НПО «Андроидная техника» [15]. Характеристики использованного гребного винта приведены в табл. 1, где приняты следующие обозначения: H/D – шаговое отношение, A/A_d – дисковое отношение, Z – количество лопастей, $n_{сер}$ – номер серии.

Таблица 1. Параметры ГВ МД АНПА «ММТ-300»

Параметр	D	H/D	A/A_d	Z	$n_{сер}$
Значение	0,14 м	0,60	0,26	3	2

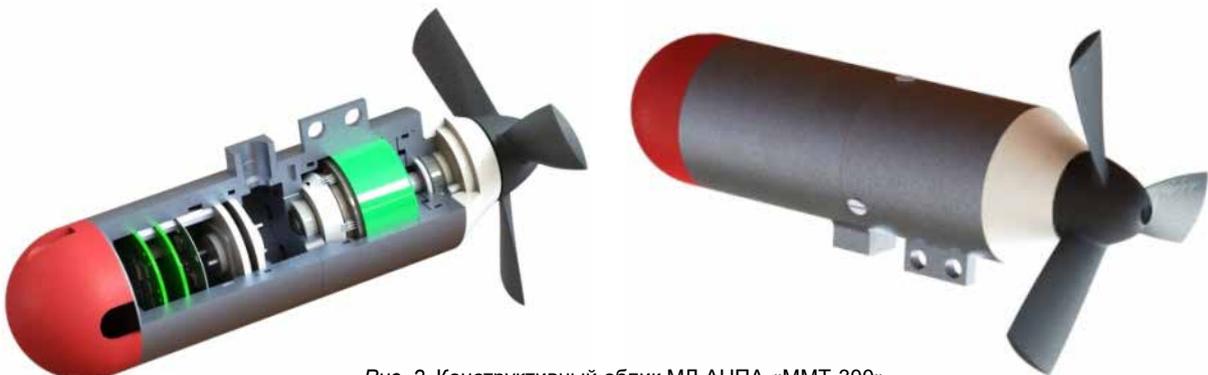


Рис. 2. Конструктивный облик МД АНПА «ММТ-300»

Кривые действия гребного винта МД $K_T(\lambda)$ и $K_M(\lambda)$, показанные на рис. 3, определены с помощью программы PROP, основанной на регрессионной базе модельных испытаний [7,16]. При этом была установлена следующая аналитическая зависимость коэффициентов момента и тяги ГВ от относительной поступи:

$$\begin{aligned} K_T(\lambda) &= K_{T0} + K_{T1} \lambda + K_{T2} \lambda^2, \\ K_M(\lambda) &= K_{M0} + K_{M1} \lambda + K_{M2} \lambda^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где K_{Ti}, K_{Mi} – коэффициенты интерполирующих полиномов, численные значения которых приведены в табл. 2.

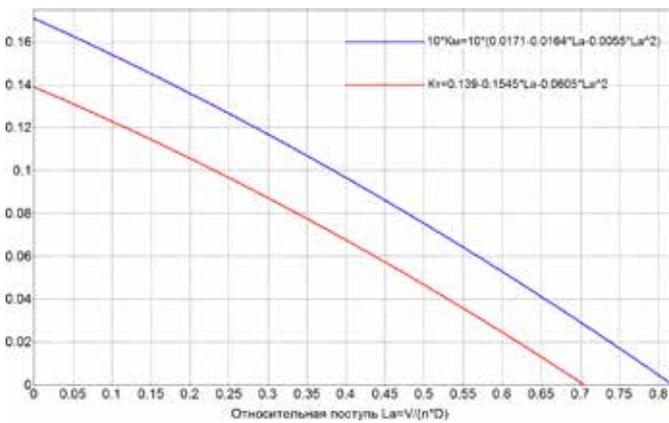


Рис. 3. Кривые действия гребного винта МД АНПА «ММТ-300»

Таблица 2. Коэффициенты интерполирующих полиномов $K_T(\lambda)$ и $K_M(\lambda)$

Параметр	K_{T0}	K_{T1}	K_{T2}	K_{M0}	K_{M1}	K_{M2}
Значение	0,139	-0,1545	-0,0605	0,0171	-0,0164	-0,0055

Зависимость упора и момента сопротивления рассматриваемого ГВ от частоты вращения и скорости хода аппарата была установлена с использованием соотношений (1) и (2). Графики этих зависимостей

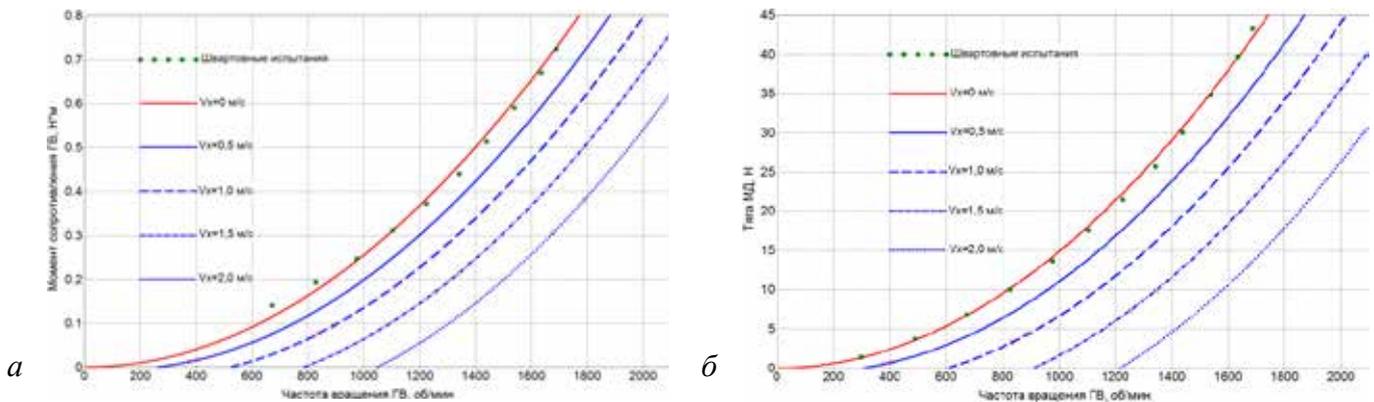


Рис. 4. Зависимость характеристик ГВ от частоты вращения и скорости набегающего потока: а – момент сопротивления ГВ, б – тяга двигателя

для скоростей хода $V_x = 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$ м/с показаны на рис. 4. Из графиков видна достаточно высокая степень совпадения результатов расчета момента и упора МД с их экспериментальными значениями, полученными в ходе швартовных испытаний в бассейне. Это позволяет сделать вывод о работоспособности принятой модели ГВ в установившемся режиме работы МД.

2. Экспериментальные исследования электропривода маршевого движителя

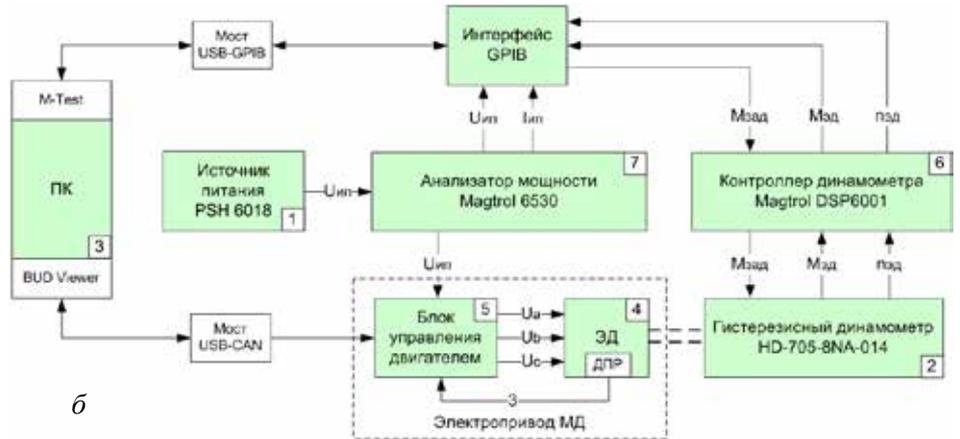
Эксплуатационные параметры электропривода в установившемся режиме работы полностью определяются его механической характеристикой (зависимостью крутящего момента от частоты вращения вала), полученной в ходе нагрузочных испытаний. Объективная оценка работы электропривода МД требует наличия семейства его экспериментальных механических характеристик во всем диапазоне кода управления. Для получения этого семейства был использован нагрузочный стенд на базе оборудования фирмы Magtrol, внешний вид и функциональная схема которого показаны на рис. 5.

Процедура испытаний электропривода заключается в измерении частоты вращения вала двигателя, тока потребления и напряжения питания его блока управления для известных значений нагрузочного момента, создаваемого гистерезисным динамометром стенда. При этом электродвижущий момент двигателя соответствует заданному коду управления, а момент нагрузки гистерезисного динамометра изменяется либо в ручном режиме, либо по программе в пределах заданного диапазона. Результаты испытаний электропривода фиксируются в виде графика зависимости его параметров от частоты вращения (рис. 6, а) и сохраняются в табличном Excel-файле, пример которого приведен в табл. 3.

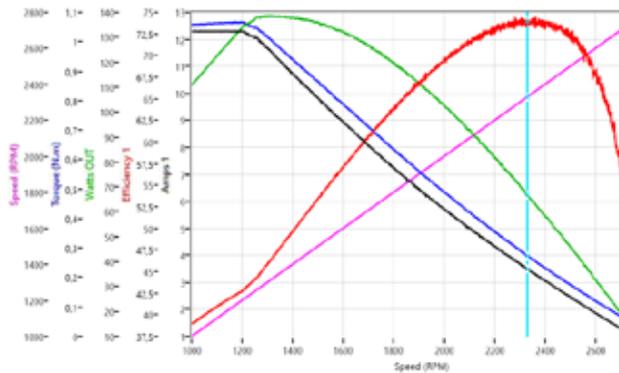


а

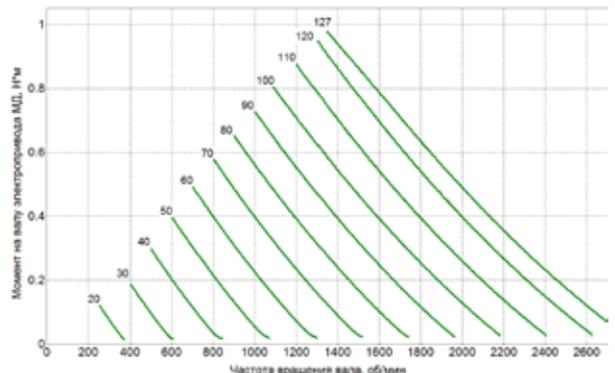
Рис. 5. Стенд нагрузочных для испытаний электропривода маршевых двигателей: а – внешний вид, б – функциональная схема



б



а



б

Рис. 6. Результаты нагрузочных испытаний электропривода МД на базе AT-Drive 50×14: а – параметры привода для кода управления +127, б – семейство механических характеристик

Таблица 3. Фрагмент результатов нагрузочных испытаний электропривода AT-Drive 50x14

Amps	Volts	Efficiency %	Watts OUT	Torque (N.m)	Speed (RPM)	Time
2,022	25,893	69,457	36,361	0,135	2572	4,577
2,029	25,893	69,224	36,347	0,135	2571	4,609
2,046	25,893	69,433	36,751	0,137	2571	4,649
2,033	25,894	69,435	36,542	0,136	2569	4,676
2,038	25,894	69,780	36,811	0,137	2569	4,718

Анализ полученного семейства экспериментальных механических характеристик выявил их существенную нелинейность в диапазоне высоких частот вращения, близких к режиму холостого хода. В средней части характеристики достаточно линейны, хотя видна зависимость, как начального смещения, так и наклона от кода управления. В случае нагрузки электропривода гребным винтом для построения модели электропривода целесообразно учитывать только те участки механической характеристики, которые «охватываются» графиками зависимости $M_{ГВ}(n_{эд}, V_x)$. При этом также необходимо учесть фактические обороты МД, необходимые для создания тяги, обеспечивающей движение аппарата с требуемой скоростью хода. На графиках рис. 7 эти участки механических характеристик выделены зеленым цветом.

С учетом принятых выше допущений в качестве математической модели электропривода МД в установленном режиме работы можно принять следующую аппроксимирующую зависимость его механической характеристики от известного значения кода управления и измеренной частоты вращения вала:

$$M_{эд}^a(n_{эд}, N_y) = M_0(N_y) + K_n(N_y) \cdot n_{эд},$$

$$M_0(N_y) = K_3^M \cdot N_y^3 + K_2^M \cdot N_y^2 + K_1^M \cdot N_y + K_0^M, \quad (3)$$

$$K_n(N_y) = K_3^n \cdot N_y^3 + K_2^n \cdot N_y^2 + K_1^n \cdot N_y + K_0^n$$

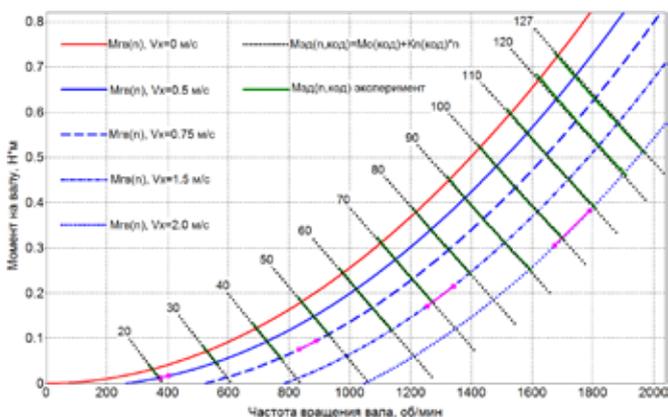


Рис. 7. Линеаризация экспериментальной механической характеристики электропривода МД

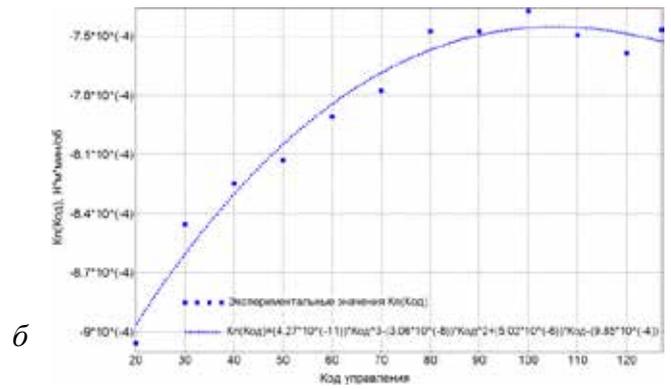
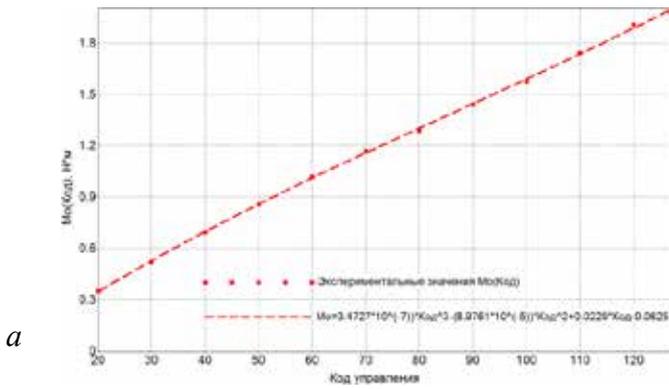


Рис. 8. Зависимость параметров линеаризации экспериментальной механической характеристики электропривода от кода управления N_y : а – $M_0(N_y)$, б – $K_n(N_y)$

где $K_3^M, K_2^M, K_1^M, K_0^M$ – коэффициенты интерполирующего полинома для вычисления смещения $M_0(N_y)$ механической характеристики; $K_3^n, K_2^n, K_1^n, K_0^n$ – коэффициенты интерполирующего полинома для вычисления наклона $K_n(N_y)$ механической характеристики. Численные значения этих коэффициентов определялись в ходе регрессионного анализа средствами программы Advance Grapher [17] зависимостей $M_0(N_y)$ и $K_n(N_y)$, графики которых показаны на рис. 8.

Естественный интерес представляет величина погрешности определения крутящего момента электропривода по частоте вращения, вызванная использованием аппроксимированной линейной модели (3) вместо экспериментальной механической характеристики. Для оценки этой погрешности используется соотношение:

$$\Delta M_{эд} = M_{эд}^э(n_{эд}, N_y) - M_{эд}^а(n_{эд}, N_y), \quad (4)$$

где $M_{эд}^э(n_{эд}, N_y)$ – экспериментальная механическая характеристика, определенная в ходе нагрузочных испытаний электропривода. Графики зависимости погрешности определения момента электродвигателя

от частоты вращения вала и кода управления, приведенные на рис. 9, показывают, что она не превышает диапазона $-0,02 \text{ Нм} \leq \Delta M_{эд} \leq +0,01 \text{ Нм}$.

3. Оценка относительной поступи и упора ГВ МД по крутящему моменту электропривода в установившемся режиме

В соответствии с равенством крутящего момента электропривода и момента сопротивления гребного винта в установившемся режиме работы МД, а также с учетом уравнений (1) и (2) получаем соотношения для вычисления относительной поступи λ :

$$\begin{aligned} K_{M2} \lambda^2 + K_{M1} \lambda + K_{M0} &= 0, \\ K_{M0}^* &= K_{M0} - \frac{M_{эд}}{\rho n_s^2 D^5 g}, \\ \lambda &= \frac{-K_{M1} + \sqrt{K_{M1}^2 - 4K_{M2} K_{M0}^*}}{2K_{M2}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Полученная оценка относительной поступи позволяет определить не только скорость набегающего потока $V_x = \lambda n_s D$, но и упор $T_{МД}$ по соотношению (1). При этом очевидно, что погрешность определения момента (4) приведет к ошибкам вычисления параметров ΔV_x и $\Delta T_{МД}$:

$$\begin{aligned} \Delta V_x &= (\lambda^э - \lambda^а) n_s D, \\ \Delta T_{МД} &= [K_T(\lambda^э) - K_T(\lambda^а)] \rho n_s^2 D^4 g; \end{aligned} \quad (6)$$

где $\lambda^э, \lambda^а$ – относительная поступь ГВ МД, определенная по соотношению (5), для $M_{эд}^э$ и $M_{эд}^а$ соответственно. Зависимости погрешностей определения скорости набегающего потока и упора МД от частоты вращения вала электропривода показаны на рис. 10, а их пределы для кодов управления МД $N_y = 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 127$ сведены в табл. 4.

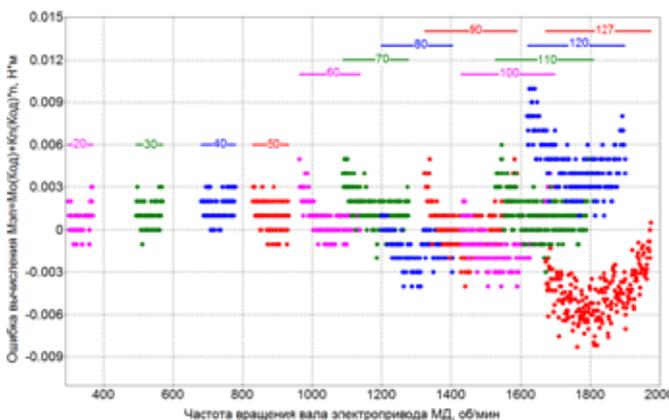


Рис. 9. Погрешность вычисления крутящего момента электропривода МД по аппроксимированной модели (3)

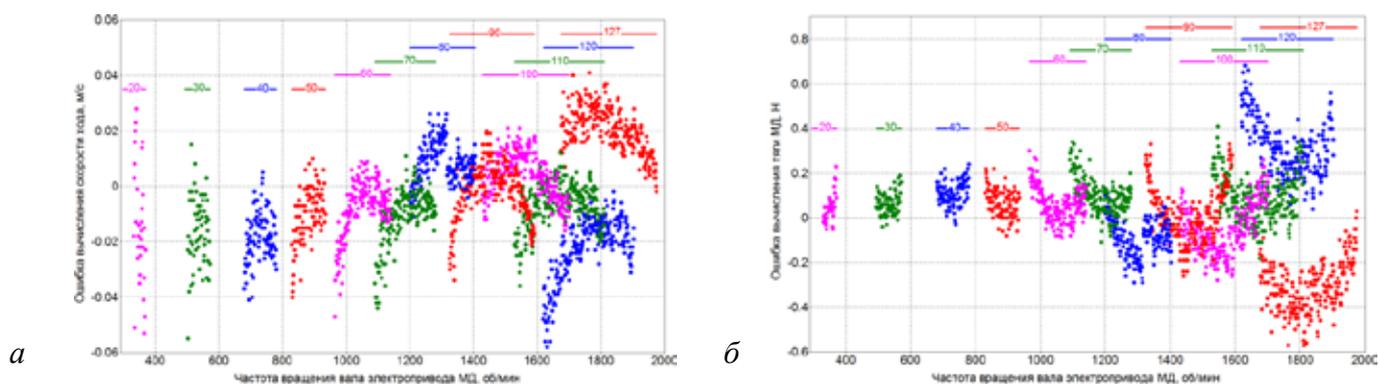


Рис. 10. Оценка ошибки определения параметров МД:
 а – ошибка вычисления скорости хода, б – ошибка определения тяги МД

Таблица 4. Диапазон ошибок определения параметров маршевого движителя

Параметр	Значение											
	127	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20
$\Delta M_{эд}$, Нм	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
ΔV_x , м/с	0,04	-0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03
	-0,01	-0,06	-0,04	-0,02	-0,03	-0,01	-0,04	-0,05	-0,04	-0,04	-0,12	-0,09
$\Delta T_{МД}$, Н	0,03	0,68	0,41	0,26	0,33	0,10	0,34	0,30	0,22	0,24	0,19	0,23
	-0,57	0,04	-0,18	-0,28	-0,26	-0,29	-0,11	-0,09	-0,08	-0,03	-0,04	-0,05

Заключение

В работе представлена методика оценки тяги маршевого движителя и момента сопротивления на его валу в режиме движения подводного аппарата с заданной скоростью хода. Для этого режима работы маршевого движителя была разработана математическая модель электропривода, основанная на его экспериментальных механических характеристиках, которая позволяет определять крутящий момент на валу в процессе движения аппарата по частоте вращения гребного винта и произвольному коду управления с погрешностью не более $\pm 0,01$ Нм относительно результатов нагрузочных испытаний.

Информация о моменте электропривода позволяет по аналитической форме кривых действия гребного винта найти соответствующие значения относительной поступи, скорости набегающего потока и тяги маршевого движителя. При этом выявленная

погрешность вычисления момента электропривода $-0,02 \text{ Нм} \leq \Delta M_{эд} \leq +0,01 \text{ Нм}$, обусловленная использованием его аппроксимированной модели, приводит к ошибкам определения скорости набегающего потока $-0,09 \text{ м/с} < \Delta V_x < +0,04 \text{ м/с}$ и тяги маршевого движителя $-0,6 \text{ Н} < \Delta T_{МД} < +0,7 \text{ Н}$.

Дальнейшее развитие работы связано с созданием технических средств измерения тяги МД на борту подводного аппарата, которые позволят вместе с использованием предложенной в статье методики оценки момента электропривода получать данные для определения фактических кривых действия гребного винта в процессе выполнения аппаратом программной миссии.

Работа выполнена по государственному заданию ИПМТ ДВО РАН «Исследование и разработка принципов создания многофункциональных робототехнических комплексов для изучения и освоения Мирового океана» (№ 121030400088-1)

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д., Касаткин Б.А., Киселев Л.В. и др. Автоматические подводные аппараты. Л.: Судостроение, 1981. 223 с.
2. Боженков Ю.А., Борков А.П., Гаврилов В.М. и др. Самоходные необитаемые подводные аппараты / под общ. ред. И.Б. Иконникова. Л.: Судостроение, 1986. 264 с.
3. Blidberg D. R. The development of autonomous underwater vehicles (AUV); a brief summary // Ieee Icr. 2001. Vol. 4. P. 1–12.
4. The technology and applications of autonomous underwater vehicles (Ocean Science and Technology, 2). Vol. 2. / Griffiths G. (ed.) Abingdon, UK: Taylor & Francis, 2003. 360 p.
5. 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.
6. Войтов Д.В. Автономные необитаемые подводные аппараты. М.: Моркнига, 2015. 332 с.
7. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение отв. ред. Л.В. Киселев; ФБГУН ИПМТ ДВО РАН. Владивосток, 2018. 368 с.
8. 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>.
9. Костенко В.В., Толстоногов А.Ю. Задача декомпозиции управления движением АНПА с учетом изменяющихся ограничений маршевых движителей // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. № 1 (203). С. 199–211.
10. Войткунский Я.И., Першиц Р.Я., Титов И.А. Справочник по теории корабля. Л.: Судпромгиз, 1960. 688 с.
11. Басин А.М., Минниович И.Я. Теория и расчет гребных винтов. Л.: Судостроение, 1963. 766 с.
12. Гофман А.Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна: справочник. Л.: Судостроение, 1988. 360 с.
13. Слижевский Н.Б., Король Ю.М., Соколик М.Г. Гидродинамический расчет самоходных подводных аппаратов: учеб. пособие. Николаев: УГМТУ, 2000. 93 с.
14. Костенко В.В., Мокеева И.Г., Найдено Н.А., Толстоногов А.Ю. Исследование методов управления тягой маршевых движителей НПА // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. № 1(211). С. 108–118.
15. Технические характеристики бесколлекторных двигателей бескорпусного исполнения. – URL: <https://npo-at.com/production/beskollektornyj-dvigatel-2/> (дата обращения: 18.04.2022).
16. 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.
17. 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 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 ДВО РАН
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
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

ТОЛСТОНОГОВ Антон Юрьевич, научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН
Адрес: 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а
Научные интересы: теория и практика создания систем управления движением автономных, телеуправляемых и гибридных подводных роботов
Тел. +7 (423) 243-24-16
E-mail: tolstonogov.anton@gmail.com
SPIN-код: 7409-6170
ORCID: 0000-0002-2839-2267
Resercher ID: AAF-8216-2021
Scopus ID: 51705049900

Для цитирования:

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

