

Шурыгин Виктор Александрович – ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»; e-mail: au@vstu.ru; 400005, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, 28; тел.: 88442248167; член-корреспондент РАН; д.т.н.; профессор; заведующий кафедрой.

Серов Валерий Анатольевич – к.т.н.; доцент.

Устинов Сергей Анатольевич – к.т.н.; доцент.

Леонард Александр Валерьевич – к.т.н.; доцент.

Червонец Сергей Евгеньевич – к.т.н.; доцент.

Платонов Виталий Николаевич – e-mail: Platonov.Vitaliy@yandex.ru; тел.: +79377509775; аспирант.

Мазлов Сергей Сергеевич – e-mail: serega.mazlov@gmail.com; тел. +79610791336; студент.

Shurygin Victor Aleksandrovich – Volgograd State Technical University; e-mail: au@vstu.ru; 28, V.I. Lenin av., Volgograd, 40005, Russia; phone +78442248167; Corresponding Member of the Russian Academy of Science; dr. of eng. sc.; professor; head of department.

Serov Valeriy Anatolievich – cand. of eng. sc.; associate professor.

Ustinov Sergey Anatolievich – cand. of eng. sc.; associate professor.

Leonard Aleksandr Valerievich – cand. of eng. sc.; associate professor.

Chervoncev Sergey Evgenievich – cand. of eng. sc.; associate professor.

Platonov Vitaliy Nikolaevich – e-mail: Platonov.Vitaliy@yandex.ru; phone +79377509775; graduate student.

Mazlov Sergey Sergeevich – e-mail: serega.mazlov@gmail.com; phone +79610791336; student.

УДК 629.127.4-52

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-108-118

В.В. Костенко, И.Г. Мокеева, Н.А. Найденко, А.Ю. Толстоногов

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОЙ МАРШЕВЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Целью исследования является оценка достоинств и недостатков существующих методов управления тягой маршевых движителей (МД) необитаемого подводного аппарата (НПА). В качестве объекта исследования была принята математическая модель МД АНПА "Х-200" разработки ИПМТ ДВО РАН, состоящая из совокупности моделей гребного электродвигателя, гребного винта и блока управления двигателем. В ходе проведенных исследований решались следующие задачи: разработка математической модели бесколлекторного гребного электродвигателя МД с уточнением параметров по результатам его нагрузочных испытаний; разработка математической модели гребного винта на основании его кривых действия, определенных в соответствии с регрессионной базой модельных испытаний PROPS; разработка математической модели блока управления двигателем (БУД); моделирование реакции движителя на ступенчатое изменение заданной тяги с регулированием электродвижущего момента электропривода по разомкнутому контуру, с обратной связью по частоте вращения гребного винта и с обратной связью по измеренной тяге. В результате проведенного моделирования реакции МД на ступенчатое изменение заданной тяги в швартовном режиме установлено, что варианты управления тягой различаются только временем переходного процесса, а статическая ошибка регулирования практически отсутствует для всех вариантов. При этом было выявлено почти двукратное преимущество в быстродействии регулирования МД по тяге и частоте вращения над регулированием по моменту, обусловленное увеличенным энергопотреблением привода в переходном процессе. Моделирование управления МД при попутном потоке, обусловленной

движением подводного аппарата, показало что регулирование по измеренной тяге имеет минимальную статическую ошибку и сопоставимое с регулированием по частоте вращения время переходного процесса.

Маршевый движитель; электропривод; гребной винт; математическая модель движителя; нагрузочные испытания; швартовная характеристика; методы управления тягой.

V.V. Kostenko, I.G. Mokeeva, N.A. Naidenko, A.Yu. Tolstonogov

RESEARCH OF MARCHING PROPULSIONS THRUST CONTROL METHODS OF UNMANNED UNDERWATER VEHICLES

The aim of the study is to assess advantages and disadvantages of existing methods for controlling thrust of main propulsions (MP) of unmanned underwater vehicles (UUV). The mathematical model of the MP developed by IMTP FEB RAS was adopted as the object of study. It's consisting of a set of models of an electric motor, propeller and thruster control unit. During the research the following tasks were solved: development of the mathematical model of a brushless motor with refine parameters based on results of its load tests; development of the mathematical model of a propeller based on its action curves determined in accordance with the PROPS model test regression base; development of the mathematical model of an thruster control unit (TCU); simulation of reaction of the thruster for stepwise change of desired thrust with the open-loop regulation of electromotive torque, with feedback on the frequency of rotation and on measured thrust. As the result of simulation main propulsion reaction on stepwise change of desired thrust in bollard pull mode it has been established that different types of thrust control are only differed in transient response time and static control error is almost non-existent for all types of control. Herewith, twofold decrease in transient response time with thrust and frequency control was found over torque control. This is due to increased power consumption of the motor in the transition process. Modeling of the MP control at the counter flow caused by the movement of the underwater vehicle showed that the control with thrust feedback has the minimum static error and transient response time is comparable with the speed control.

Main propulsion; electric drive; propeller; mathematical model of propulsion; load tests; bollard mode characteristic; thrust control methods.

Введение. Наиболее производительным и безопасным средством выполнения обзора поисковых и инспекционных работ под водой без ограничения глубины погружения является автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА) [1–8]. 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 соответствие реальной тяги движителей целевым значениям, определенным регуляторами движения [9–12]. Целью настоящей работы является сравнительный анализ точности и быстродействия методов управления тягой маршевых движителей подводного аппарата, основанный на результатах компьютерного моделирования. Для достижения поставленной цели необходимо разработать адекватные Simulink - модели МД для трех вариантов управления тягой: по моменту электропривода, с обратной связью по частоте вращения гребного винта (ГВ) и с обратной связью по измеренной тяге движителя. При этом необходимо учитывать результаты экспериментальных исследований как электропривода, так и движителя.

Модель электропривода. Динамика бесколлекторного электродвигателя (ЭД), наиболее часто используемого в качестве привода движителей, может быть представлена моделью эквивалентного по характеристикам электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением [13–15]. Функциональная схема этой модели приведена на рис. 1.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: N_y – код управления приводом, $K_{БУД}$ – коэффициент передачи блока управления двигателем (БУД); U_ϕ, I_ϕ – фазное напряжение и ток ЭД, соответственно; R_ϕ, L_ϕ – активное сопротивление и индуктивность фазы ЭД, соответственно; C_M, C_E – приведенные к фазе коэффициенты момента и ЭДС, соответственно; J_p, J_H – моменты инерции ротора и нагрузки, соответственно; $M_H, M_{ГВ}$ – момент нагрузки ЭД и ГВ, соответственно; E_ϕ – приведенная к фазе ЭДС самоиндукции; ω – угловая скорость вращения вала ЭД.

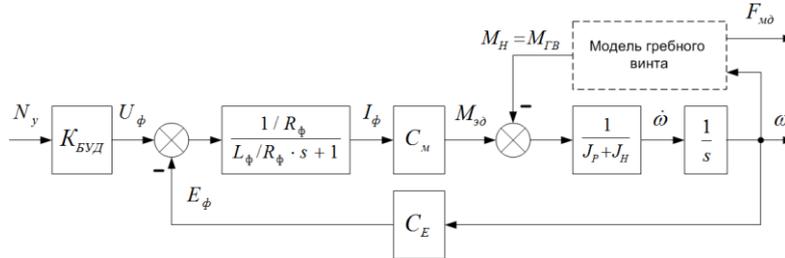


Рис. 1. Функциональная схема бесколлекторного электропривода

В соответствии с приведенной выше функциональной схемой разработана Simulink - модель электропривода на базе бесколлекторного электродвигателя FL42BLSH03 (рис. 2).

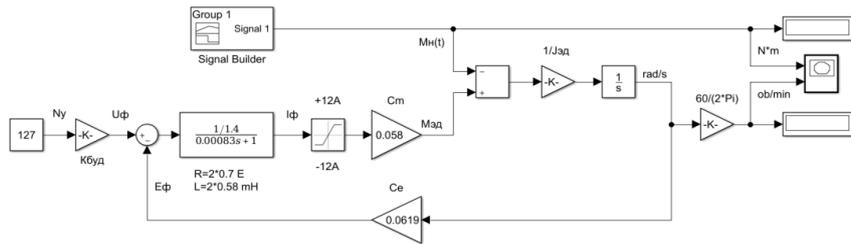


Рис. 2. Simulink - модель электропривода на базе бесколлекторного электродвигателя FL42BLSH03

Для уточнения параметров этой модели были проведены нагрузочные испытания электропривода, суть которых заключалась в измерении угловой скорости вала при изменяющемся по программе нагрузочном моменте и фиксированном коде управления [7, 16]. Результаты нагрузочных испытаний электродвигателя FL42BLSH03 [17] для кодов управления $20 \leq N_y \leq 127$ приведены на рисунке 3.

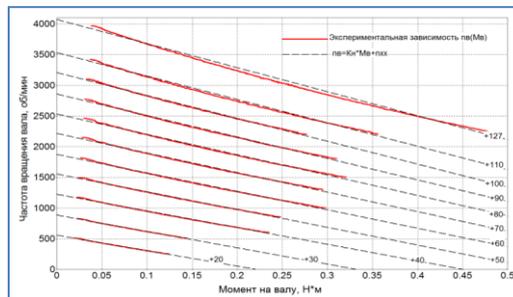


Рис. 3. Семейство механических характеристик $n_{эд}(M_H)$ электропривода на FL42BLSH03 для кодов управления $20 < N_y < 127$

В ходе анализа экспериментальных механических характеристик (см. рис. 3) установлена возможность их линейного представления. В результате итерационного поиска параметров C_m и C_e электродвигателя было найдено их сочетание, обеспечивающее хорошее совпадение линеаризованного представления экспериментальных механических характеристик привода с характеристиками модели рис. 2. Использованный подход позволил привести в соответствие статические характеристики предложенной модели привода с его экспериментальными характеристиками. Основные параметры модели привода сведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры модели электропривода на FL42BLSH03

$C_m, Н \cdot м/А$	$C_e, В/(\frac{рад}{с})$	$R_\phi, Ом$	$L_\phi, мН$	$U_{фмакс}, В$	$J_{эд}, г/см^2$	$K_{БУД}, \frac{В}{ед. кода}$
0,058	0,0619	0,70	0,58	25,9	154	25,9/127

Модель гребного винта. Параметры модели гребного винта (ГВ) маршевого движителя определяются зависимостями его тяги $T_{мд}$ и момента нагрузки для привода $M_{ГВ}$ от частоты вращения вала и скорости движения НПА. Согласованным с приводом является ГВ, который при движении НПА со скоростью хода V_x на выбранной частоте вращения привода n_b создает заданную тягу при моменте нагрузки $M_{ГВ}$, соответствующем оптимальным параметрам электродвигателя. Такой ГВ обеспечивают условия равенства крутящего момента привода и момента нагрузки ГВ $M_{эп} = M_{ГВ}$ при заданных значениях V_x и n_b . Для поиска геометрических параметров согласованного с приводом ГВ (диаметр $D_{ГВ}$, шаговое отношение $\zeta = H/D_{ГВ}$, число лопастей Z и дисковое отношение $\nu = A/A_d$) можно использовать прикладную программу PSOP [7, 18], основанную на данных регрессионной базы серийных испытаний гребных винтов Дайдола-Джонсона [19]. Для принятых к расчету геометрических параметров ГВ программа определяет коэффициенты упора K_t и момента K_m по формулам:

$$K_t = \sum_i C_{ti} \cdot \lambda^{S_{1i}} \cdot \zeta^{T_{1i}} \cdot \nu^{U_{1i}} \cdot Z^{V_{1i}}, \quad (1)$$

$$K_m = \sum_j C_{mj} \cdot \lambda^{S_{2j}} \cdot \zeta^{T_{2j}} \cdot \nu^{U_{2j}} \cdot Z^{V_{2j}}, \quad (2)$$

где $\lambda = \frac{V_x}{n_b \cdot D_{ГВ}}$ – относительная поступь ГВ; $C_{ti}, S_{1i}, T_{1i}, U_{1i}, V_{1i}, C_{mj}, S_{2j}, T_{2j}, U_{2j}, V_{2j}$ – полиномиальные коэффициенты регрессионной базы данных [19].

Далее значения тяги и момента сопротивления ГВ, соответствующие его оборотам и скорости хода НПА, вычисляются по классическим формулам [20]

$$T_{мд} = K_t(\lambda) \cdot \rho \cdot n_b^2 \cdot D_{ГВ}^4, \quad (3)$$

$$M_{ГВ} = K_m(\lambda) \cdot \rho \cdot n_b^2 \cdot D_{ГВ}^5, \quad (4)$$

где $K_t(\lambda) = K_{t0} + K_{t1} \cdot \lambda + K_{t2} \cdot \lambda^2$, $K_m(\lambda) = K_{m0} + K_{m1} \cdot \lambda + K_{m2} \cdot \lambda^2$ – аналитическое представление зависимостей коэффициентов упора и момента от относительной поступи [7, 18]. На рис. 4 приведены графики этих зависимостей для МД АНПА "ММТ-200" ($D_{ГВ} = 0,122$ м, $\zeta = H/D_{ГВ} = 0,656$, $Z = 2$, $\nu = A/A_d = 0,3$).

В соответствии с вышеизложенным была разработана Simulink-модель ГВ, изображенная на рис. 5.

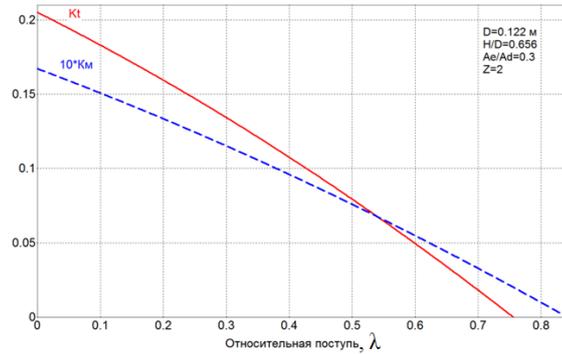


Рис. 4. Графики кривых действия ГВ МД АНПА "ММТ-200": $K_t(\lambda) = 0,205 - 0,2126 \cdot \lambda - 0,0777 \cdot \lambda^2$, $K_m(\lambda) = 0,0167 - 0,0159 \cdot \lambda - 0,0047 \cdot \lambda^2$.

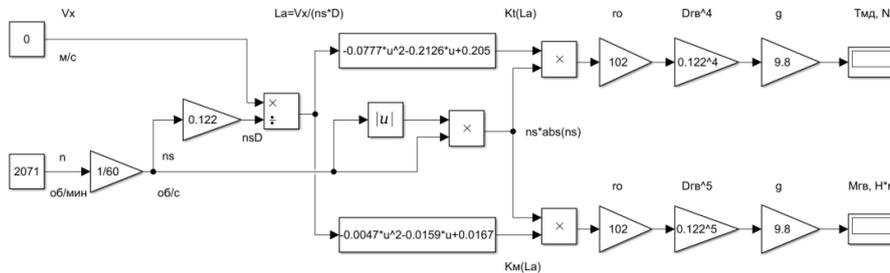


Рис. 5. Simulink-модель гребного винта маршевого движителя АНПА "ММТ-200"

Влияние гребного винта на динамику переходных процессов движителя в модели учитывается введением дополнительной составляющей приведенного момента инерции электродвигателя в соответствии с выражением

$$J_{\Sigma} = J_{\text{эд}} + J_{\text{ГВ}} + J_{\text{пв}}, \quad (5)$$

где J_{Σ} – суммарный приведенный момент инерции электродвигателя, $J_{\text{ГВ}}$ – приведенный момент инерции сухого винта, $J_{\text{пв}}$ – момент инерции присоединенной массы воды. Влияние воды на приведенный момент инерции погруженного в нее ГВ на основании данных практики оценивается увеличением полученного в результате расчета приведенного момента инерции сухого винта на 25–40 % [21]. При этом для суммарного приведенного момента инерции можно записать

$$J_{\Sigma} = J_{\text{эд}} + 1,4 \cdot J_{\text{ГВ}}. \quad (6)$$

Моделирование вариантов управления маршевым движителем. Анализ опыта разработки систем управления движением НПА и систем динамического позиционирования судов подтверждает наличие трех вариантов управления движителями: управление по моменту ЭД, управление по оборотам ГВ и управление по упору [22]. Структурные схемы вариантов управления приведены на рис. 6.

На рис. 6 приняты следующие обозначения: T_3 – заданное значение тяги движителя; $N_y(T_{\text{МД}})$ – калибровочная характеристика движителя, определенная как обратная функция статической швартовной характеристики $T_{\text{МД}}(N_y)$; $n_b(T_{\text{МД}})$ – калибровочная характеристика движителя, определенная как обратная функция экспериментальной швартовной характеристики $T_{\text{МД}}(n_b)$.

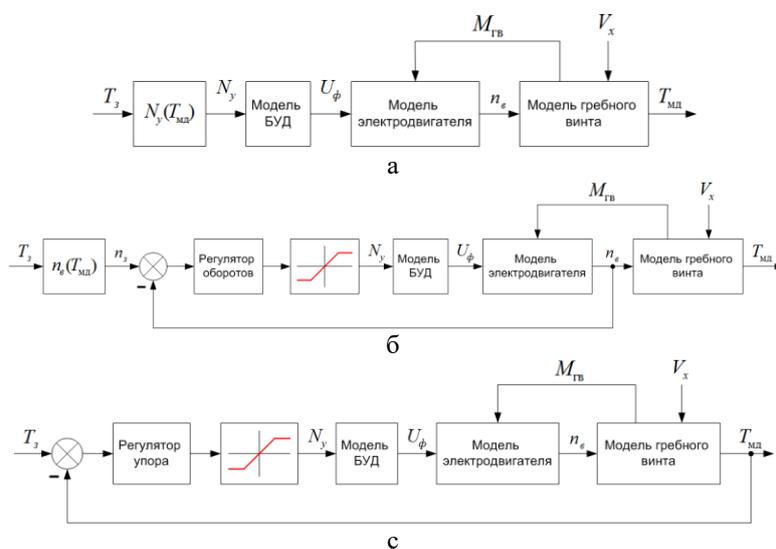


Рис. 6. Структурные схемы вариантов управления движителем: а – управление по моменту ЭД, б – управление по оборотам ГВ, с – управление по упору

В результате бассейновых испытаний были определены швартовные и калибровочные характеристики МД АНПА "Х-200", показанные на рис. 7–10.

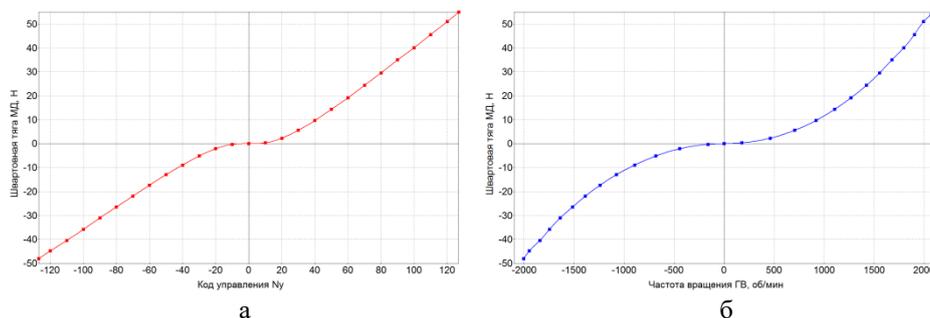


Рис. 7. Экспериментальные швартовные характеристики движителя: а – $T_{\text{МД}}(N_y)$, б – $T_{\text{ш}}(n_{\text{В}})$

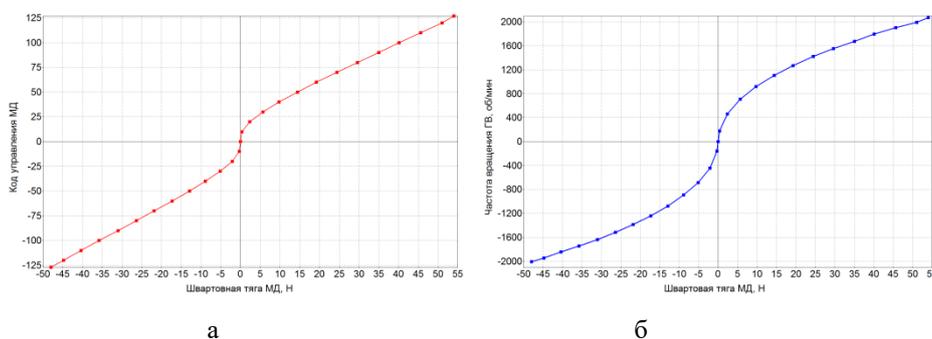


Рис. 8. Экспериментальные калибровочные характеристики движителя: а – $N_y(T_{\text{МД}})$, б – $n_{\text{В}}(T_{\text{ш}})$

Каждому варианту управления двигателем соответствует свой регулятор, формирующий код управления электроприводом N_y на основании заданной тяги, обратных связей и ограничений параметров, соответствующих методу. Для управления электроприводом моментом привода по разомкнутому контуру выбран регулятор вида

$$N_{y1} = \begin{cases} N_y(T_{мд}), & -127 < N_y < 127; \\ 127 \cdot \text{sign}N_y, & |N_y| \geq 127. \end{cases} \quad (7)$$

Метод управления с обратной связью по частоте вращения ГВ предполагает предварительное вычисление заданных оборотов ГВ n_3 в соответствии с калибровочной характеристикой $n_b(T_{ш})$ и последующей обработкой ошибки П-регулятором

$$N_{y2} = \begin{cases} (n_3(T_3) - n_b) \cdot K_{п2}, & -127 < N_y < 127; \\ 127 \cdot \text{sign}N_y, & |N_y| \geq 127. \end{cases} \quad (8)$$

где $K_{п2}=500$ – масштабный коэффициент П-регулятора.

Управление с обратной связью по измеренному упору двигателя реализовано ПИ-регулятором

$$N_{y3} = \begin{cases} (T_3 - T_{мд}) \cdot K_{п3} + K_{и3} \int (T_3 - T_{мд}) \cdot dt, & -127 < N_y < 127; \\ 127 \cdot \text{sign}N_y, & |N_y| \geq 127. \end{cases} \quad (9)$$

где $K_{п3}=400$, $K_{и3}=40$ – пропорциональный и интегральный масштабные коэффициенты ПИ-регулятора, соответственно.

В результате проведенного моделирования были получены графики переходных функций упора маршевого двигателя АНПА "Х-200" на заданное значение $T_3 = 51$ Н для трех вариантов управления в швартовном режиме (рис. 9,а) и на скорости движения аппарата $V_x = 0,5$ м/сек (рис. 9,б).

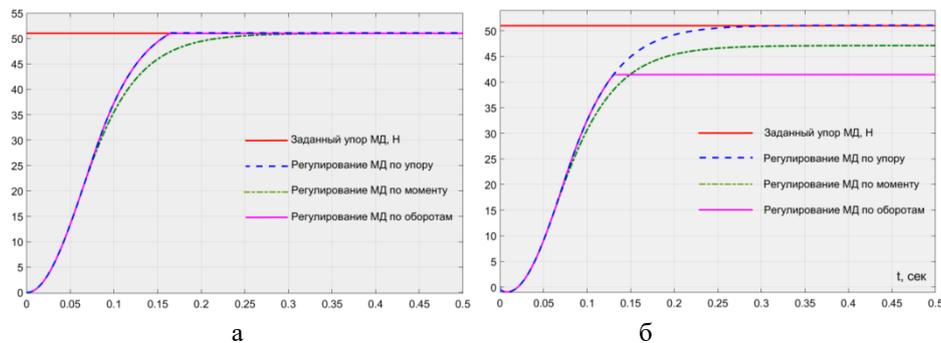


Рис. 9. Переходные функции маршевого двигателя АНПА "ММТ-200":
а – швартовный режим ($V_x = 0$ м/с), б – на скорости аппарата $V_x = 0,5$ м/с

Как видно из полученных графиков, в швартовном режиме варианты управления различаются только временем переходного процесса, а статическая ошибка регулирования практически отсутствует. При этом наблюдается почти двукратное увеличение быстродействия регулирования по упору и оборотам в сравнении с регулированием по моменту. В условиях ненулевой скорости набегающего потока, обусловленной движением аппарата, появляется значительная ошибка регулирования упора по моменту и оборотам. Причиной этого может быть то, что управления по оборотам и моменту привода определяет заданные значения оборотов и кода управления по швартовным характеристикам двигателей, которые не учитывают влияния набегающего потока.

Энергетические затраты исследуемых методов управления позволяют оценить графики рис. 10, где $N_{э} = U_{б\text{уд}} \cdot I_{\phi}$ – электрическая мощность потребления двигателя, $U_{б\text{уд}}$ – напряжение питания БУД, I_{ϕ} – фазный ток электродвигателя.

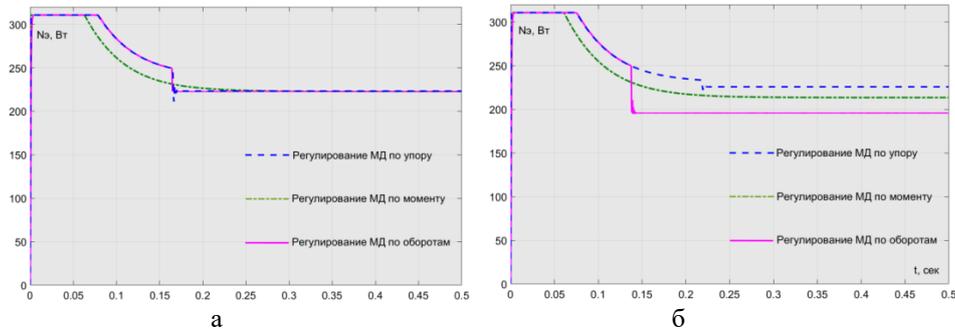


Рис. 10. Энергопотребление МД АНПА "ММТ-200" при $T_3 = 51$ Н:
 а – швартовный режим ($V_x = 0$ м/с), б – на скорости аппарата $V_x = 0,5$ м/с

Заключение. В статье рассмотрены основные методы управления упором маршевых двигателей: регулированием электродвижущего момента привода по разомкнутому контуру, регулированием с обратной связью по оборотам гребного винта и регулированием с обратной связью по упору. Для исследования достоинств и недостатков этих методов была разработана модель бесколлекторного привода, параметры которой корректируются по результатам его нагрузочных испытаний, а также модель гребного винта, учитывающая влияние скорости движения аппарата. Кривые действия модели гребного винта определялись в ходе гидродинамического расчета прикладной программой PSOP по геометрическим параметрам и далее уточнялись по результатам бассейновых испытаний маршевого двигателя АНПА "ММТ-200" в швартовном режиме.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы:

- ♦ в швартовном режиме работы двигателя варианты управления различаются только временем переходного процесса, а статическая ошибка регулирования практически отсутствует;
- ♦ при этом двойное увеличение быстродействия регулирования по оборотам и упору обусловлено дополнительными энергетическими затратами на автоматическую отработку начальной ошибки, выводящей регуляторы в ограничение на больший период времени в сравнении с разомкнутым регулированием по моменту привода;
- ♦ в режиме движения аппарата с установившейся скоростью выявлены значительное увеличение статических ошибок (регулирование по моменту – 5 %, регулирование по оборотам – 10 %) в сравнении с регулированием по упору, что, вероятно, связано с некорректным определением заданных значений регулирования по швартовным характеристикам двигателя, не учитывающим влияние набегающего потока.
- ♦ регулирование двигателя по моменту обеспечивает минимальное энергопотребление и отсутствие динамических перегрузок системы энергообеспечения.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований по приоритетным направлениям, определяемым Президиумом Российской академии наук, №7 "Новые разработки в перспективных направлениях энергетики, механики и робототехники", а также гранта №18-5-054 "Разработка методов синтеза информационно-управляющих систем подводных робототехнических средств для автоматического выполнения подводных операций в условиях частично неопределенного окружения" программы "Приоритетных научных исследований в интересах комплексного развития ДВО РАН".

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агеев М.Д., Касаткин Б.А., Киселев Л.В. и др. Автоматические подводные аппараты. – Л.: Судостроение, 1981. – 223 с.
2. Боженов Ю.А., Борков А.П., Гаврилов В.М. и др. Самоходные обитаемые 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 // *IeeeIcra*. – 2001. – Vol. 4. – P. 1-12.
4. *Griffiths G.* (ed.). *The technology and applications of autonomous underwater vehicles* (Ocean Science and Technology, 2). – 2003. – Vol. 2. Abingdon, UK. Taylor & Francis. – 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 обитаемые 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 Ин-т проблем морских технологий ДВО РАН. – Владивосток, 2018. – 368 с.
8. *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.
9. *Костенко В.В.* Алгоритмы управления движительно-рулевым комплексом привязного телеуправляемого подводного аппарата // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2006. – № 9. – С. 31-36.
10. *Костенко В.В., Павин А.М.* К вопросу обеспечения независимости управляющих воздействий движительно-рулевого комплекса подводного аппарата // Матер. 6-й научно-технической конференции «Технические проблемы освоения мирового океана». Владивосток, 28 сентября – 2 октября 2015. – С. 118-123.
11. *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>.
12. *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.
13. *Беленький Ю.М., Зеленков Г.С., Микеров А.Г.* Опыт разработки и применения бесконтактных моментных приводов. – Л.: ЛДНТП, 1987. – 28 с.
14. *Емельянов А.А., Бескеткин В.В., Агзамов И.М. и др.* Математическое моделирование двигателя постоянного тока в системе относительных единиц в Matlab и Си // Молодой ученый. – 2019. – № 11. – С. 1-7. – URL: <https://moluch.ru/archiv/249/57298/> (дата обращения: 23.02.2020).
15. *Abu Sharkh S., Harris M.R., Crowder R.M., Chappell P.H., Stoll R.L. and Sykulski J.K.* Design considerations for electric drives for the thrusters of unmanned underwater vehicles // 6th European Conference on peer Electronics and Applications, Sevilla, 1995. – P. 799-801.
16. *Костенко В.В., Михайлов Д.Н., Найденов Н.А.* Определение параметров гребного электропривода по результатам нагрузочных и бассейновых испытаний // Матер. 5-й научно-технической конференции «Технические проблемы освоения мирового океана», Владивосток, 30 сентября – 4 октября 2013. – С. 389-395. – ISBN 978-5-8044-1409-3.
17. 42 mm High Torque Brushless Motor. – URL: <http://motor-fulling.com/6-7-high-torque-brushless-motor.html> (дата обращения: 25.02.2020).
18. *Костенко В.В., Михайлов Д.Н., Нечаев В.Д., Толстоногов А.Ю.* Оценка требований к гребному электроприводу автономного обитаемого подводного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 1-2 (186-187). – С. 97-108.
19. *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.
20. *Пантов Е.Н., Махин Н.Н., Шереметов Б.Б.* Основы теории движения подводных аппаратов. – Л.: Судостроение, 1973. – 210 с.

21. Энциклопедия по машиностроению XXL. Оборудование, материалы, механика. – URL: <https://mash-xxl.info/info/296203/> (дата обращения: 19.02.2020).
22. Sorensen A.J. "3.6 Methods for Thrust Control Asgeir J. Sorensen". The Ocean Engineering Handbook. 2000 Dec 28.

REFERENCES

1. Ageev M.D., Kasatkin B.A., Kiselev L.V. *i dr.* Avtomaticheskie podvodnye apparaty [Automatic underwater vehicles]. Leningrad: Sudostroenie, 1981, 223 p.
2. Bozhenov Yu.A., Borkov A.P., Gavrilov V.M. *i dr.* Samokhodnye neobitaemye podvodnye apparaty [Self-propelled uninhabited underwater vehicles], under the General ed. of I.B. Ikonnikova. Leningrad: Sudostroenie, 1986, 264 p.
3. Blidberg D.R. The development of autonomous underwater vehicles (AUV); a brief summary, *IeeeIcra*, 2001, Vol. 4, pp. 1-12.
4. Griffiths G. (ed.). *The technology and applications of autonomous underwater vehicles* (Ocean Science and Technology, 2), 2003, Vol. 2. Abingdon, UK. Taylor & Francis, 360 p.
5. Ageev M.D., Kiselev L.V., Matvienko Yu.V. *i dr.* Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy i tekhnologii [Autonomous underwater robots: systems and technology], under the General ed. of M.D. Ageeva. Moscow: Nauka, 2005, 223 p.
6. Voytov D.V. Avtonomnye neobitaemye podvodnye apparaty [Autonomous uninhabited underwater vehicles]. Moscow: Morkniga, 2015, 332 p.
7. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F. Podvodnye robototekhnicheskie komplekсы: sistemy, tekhnologii, primeneniye [Underwater robotic systems: systems, technologies, applications], responsible ed. L.V. Kiselev. Vladivostok, 2018, 368 p.
8. Matvienko Yu.V., Boreyko A.A., Kostenko V.V., L'vov O.Yu., Vaulin Yu.V. Kompleks robototekhnicheskikh sredstv dlya vypolneniya poiskovykh rabot i obsledovaniya podvodnoy infrastruktury na shel'fe [Complex robotic tools to perform searches and surveys of underwater infrastructure on the shelf], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigation and Robotics], 2015, No. 1 (19), pp. 4-15.
9. Kostenko V.V. Algoritmy upravleniya dvizhiteľno-rulevym kompleksom privyaznogo telepravlyаемого podvodnogo apparata [Algorithms for controlling the propulsion-steering complex of a tethered remote-controlled underwater vehicle], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2006, No. 9, pp. 31-36.
10. Kostenko V.V., Pavin A.M. K voprosu obespecheniya nezavisimosti upravlyayushchikh vozdeystviy dvizhiteľno-rulevogo kompleksa podvodnogo apparata [On the issue of ensuring the independence of control actions of the propulsion-steering complex of the underwater vehicle], *Mater. 6-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tekhnicheskie problemy osvoeniya mirovogo okeana». Vladivostok, 28 sentyabrya – 2 oktyabrya 2015* [Proceeding of the 6th scientific and technical conference "Technical problems of development of the oceans», Vladivostok, September 28 – October 2. 2015], pp. 118-123.
11. Kostenko V.V., Tolstonogov A.Yu. AUV Thrust Allocation with Variable Constraints, *ADV. Syst. SciAppl*, 2017, No. 3, pp. 1-8. Available at: <http://ijassa.ipu.ru/ojs/ijassa/article/view/502>.
12. Kostenko V.V., Tolstonogov A.Yu. Zadacha dekompozitsii upravleniya dvizheniem ANPA s uchetom izmenyayushchikhsya ogranicheniy marshevykh dvizhiteley [AUV's Motion Control Allocation with Variable Properties of Propulsion System], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 1 (203), pp. 199-211.
13. Belen'kiy Yu.M., Zelenkov G.S., Mikerov A.G. Opyt razrabotki i primeneniya beskontaktnykh momentnykh privodov [Experience in the development and application of brushless torque drives]. Leningrad: LDNTP, 1987, 28 p.
14. Emel'yanov A.A., Beskletkin V.V., Agzamov I.M. *i dr.* Matematicheskoe modelirovaniye dvigatelya postoyannogo toka v sisteme otноситel'nykh edinit v Matlab i Si [Mathematical modeling of a DC motor in a system of relative units in Matlab and C], *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2019, No. 11, pp. 1-7. Available at: <https://moluch.ru/archiv/249/57298/> (accessed 23 February 2020).
15. Abu Sharkh S., Harris M.R., Crowder R.M., Chappell P.H., Stoll R.L. and Sykulski J.K. Design considerations for electric drives for the thrusters of unmanned underwater vehicles, *6th European Conference on peer Electronics and Applications, Sevilla, 1995*, pp. 799-801.

16. *Kostenko V.V., Mikhaylov D.N., Naydenko N.A.* Opredelenie parametrov grebnogo elektroprivoda po rezul'tatam nagruzochnykh i basseynovykh ispytaniy [Determination of the parameters of the electric propeller drive according to the results of load and pool tests], *Materialy 5-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tekhnicheskie problemy osvoeniya mirovogo okeana», Vladivostok, 30 sentyabrya – 4 oktyabrya 2013* [Proceeding of the 5th scientific and technical conference "Technical problems of development of the oceans», Vladivostok, September 30 - October 4, 2013], pp. 389-395. ISBN 978-5-8044-1409-3.
17. 42 mm High Torque Brushless Motor. Available at: <http://motor-fulling.com/6-7-high-torque-brushless-motor.html> (accessed 25 February 2020).
18. *Kostenko V.V., Mikhaylov D.N., Nechaev V.D., Tolstonogov A.Yu.* Otsenka trebovaniy k grebному электроприводу avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Assessment of requirements for the rowing electric drive of an Autonomous uninhabited underwater vehicle], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 1-2 (186-187), pp. 97-108.
19. *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.
20. *Pantov E.N., Makhin N.N., Sheremetov B.B.* Osnovy teorii dvizheniya podvodnykh apparatov [Fundamentals of the motion's theory of underwater vehicles]. Leningrad: Sudostroenie, 1973, 210 p.
21. Entsiklopediya po mashinostroeniyu XXL. Oborudovanie, materialy, mekhanika [Encyclopedia of Mechanical Engineering XXL. Equipment, materials, mechanics]. Available at: <https://mash-xxl.info/info/296203/> (accessed 19 February 2020).
22. *Sorensen A.J.* "3.6 Methods for Thrust Control Asgeir J. Sorensen". The Ocean Engineering Handbook. 2000 Dec 28.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Н. Жирабок.

Костенко Владимир Владимирович – Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: kostenko@marine.febras.ru; 690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а; тел.: 84232432578; Лаборатория исполнительных устройств и систем телеуправления; к.т.н.; зав. лабораторией.

Найденко Николай Андреевич – e-mail: denmih@marine.febras.ru; Лаборатория исполнительных устройств и систем телеуправления; н.с.

Мокеева Ирина Геннадьевна – e-mail: mokeeva@marine.febras.ru; Лаборатория исполнительных устройств и систем телеуправления; с.н.с.

Толстоногов Антон Юрьевич– e-mail: bioniwulf@gmail.com; Лаборатория исполнительных устройств и систем телеуправления; н.с.

Kostenko Vladimir Vladimirovich – Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch Russian Academy of Science; e-mail: kostenko@marine.febras.ru; 5a, Sukhanova street, Vladivostok, 690950, Russia; phone: 84232432578; Laboratory actuating devices and remote control systems; cand. of eng. sc.; laboratory head.

Naidenko Nikolay Andreevich – e-mail: nna0502@gmail.com; Laboratory actuating devices and remote control systems; researcher.

Mokeeva Irina Gennadievna – e-mail: mokeeva@marine.febras.ru; Laboratory actuating devices and remote control systems; senior researcher.

Tolstonogov Anton Yurevich – e-mail: bioniwulf@gmail.com; Laboratory actuating devices and remote control systems; researcher.