

Раздел IV. Приводы и системы энергетики

УДК 629.127

DOI 10.18522/2311-3103-2017-1-97108

В.В. Костенко, Д.Н. Михайлов, В.Д. Нечаев, А.Ю. Толстоногов

ОЦЕНКА ТРЕБОВАНИЙ К ГРЕБНОМУ ЭЛЕКТРОПРИВОДУ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Приведены результаты исследований, направленных на обоснование требований к гребному электроприводу маршевых движителей автономного необитаемого подводного аппарата, которые обусловлены максимальной скоростью его движения по модели использования, гидродинамическими характеристиками корпуса, вариациями остаточной плавучести и компоновкой движительно-рулевого корпуса. Традиционно, выбор параметров электропривода движителей определяется балансом лобового сопротивления аппарата на максимальной скорости с нулевым углом атаки и результирующей тягой ДРК. При этом не учитывается необходимость резервирования ресурсов ДРК для компенсации на ходу остаточной плавучести аппарата, которая изменяется в зависимости от плотности воды и глубины погружения, а также моментных возмущений, обусловленных обтеканием корпуса. Целью статьи является точное определение значений мощности и частоты вращения вала маршевых движителей, обеспечивающих заданную скорость маршевого движения АНПА с гидродинамической компенсацией его остаточной плавучести и угловой стабилизацией. Для этого определена математическая модель установившегося движения аппарата, на основании которой найден баланс позиционных гидродинамических сил и моментов, момента остойчивости, остаточной плавучести и управляющих воздействиями ДРК. С учетом результатов виртуальной продувки 3-D модели АНПА и для выбранной компоновочной схемы ДРК определена требуемая тяга максимально загруженного маршевого движителя и мощность на его валу. В ходе гидродинамического расчета гребного винта (ГВ) найдены его конструктивные параметры для рабочей точки внешней характеристики ГЭП, подтвержденной его нагрузочными испытаниями. Предложенный подход позволяет не только определить основные технические решения при проектировании ДРК, но и сформулировать обоснованные требования к энергоустановке аппарата.

Автономный необитаемый подводный аппарат; режим установившегося движения; гребной электропривод; гидродинамические характеристики; движитель; лобовое сопротивление; остаточная плавучесть.

V.V. Kostenko, D.N. Mikhailov, V.D. Nechaev, A.Yu. Tolstonogov

SCORE REQUIREMENTS TO THRUSTERS DRIVE OF THE AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE

The article provides results of research aimed to support of the requirements for thruster motors of an AUV /Autonomous Underwater Vehicle/. This claim caused by maximum speed of the vehicle along the thruster direction, hydrodynamic characteristics of hull, variation of restoring force and geometry of propulsion system. Traditionally, the choice of the thruster motor determined by balance of hydrodynamic resistance of the vehicle at maximum speed with angle of attack equals to zero and the result thrust of the propulsion system. Generally, necessity of thrust resource reservation for restoring force compensation is not taken to account. Furthermore, the restoring force is changed by the water density, vehicle depth and disturbances of hydrodynamic moments caused by nonuniform flow around the hull. The aim of the article is precise definition of power and rotation frequency of thruster motors ensuring target vehicle velocity with hydrodynamic compensation of restoring force and stabilization of angle of attack. For that purpose mathematical model of stationary vehicle motion was designed. Based on the model, balance of stationary hydrodynamic forces and moments, restoring force and moments

and propulsion thrust was found. Following the results of hydrodynamic simulation of vehicle hull and chosen propulsion geometry, required thrust and power of the most loaded thruster were found. The propeller specifications for optimum load of thruster motor at this point of thrust were found. The suggested method provides to determine not only main thrust and geometry requirements to newly designed propulsion system but reasonable demands to electric supply of the vehicle.

Autonomous underwater vehicle; steady-state mode movement; restoring forces; thruster forces; thrusters drive; hydrodynamic characteristics of AUV.

Введение. Целью проведенных исследований являлась разработка методики определения параметров привода маршевых движителей, обеспечивающих движение АНПА с требуемой скоростью хода и гидродинамической компенсацией его остаточной плавучести за счет регулируемого угла атаки. При этом учитываются дополнительные ресурсы маршевых движителей, необходимые для создания угла атаки, а также компенсации увеличения лобового сопротивления, обусловленного не нулевым значением этого угла. В ходе расчета использовались математическая модель установившегося движения аппарата в скоростной системе координат, зависимости позиционных гидродинамических сил и моментов аппарата, полученные в ходе виртуальной продувки его 3-D модели, результаты нагрузочных испытаний гребного электропривода (ГЭП) и результаты гидродинамического расчета гребных винтов (ГВ).

Традиционно требования к тяговым характеристикам маршевых движителей определяются на основании приближенной оценки лобового сопротивления аппарата на заданной скорости хода и без учета ресурсов ДРК, необходимых для стабилизации углового положения и компенсации остаточной плавучести [1–6]. При этом не учитывается практическая реализуемость требуемой тяги ГВ, а также частоты вращения и крутящего момента ГЭП. Оценка гидродинамического сопротивления производится исходя из среднестатистического значения коэффициента гидродинамического сопротивления на нулевом угле атаки и расчетном водоизмещении аппарата. В результате применения предлагаемого в статье подхода, использующего виртуальную продувку модели аппарата, гидродинамический расчет ГВ и нагрузочные испытания ГЭП, определяются конструктивные параметры винта, а также подбирается соответствующий ему электродвигатель ГЭП, которые в комплексе гарантируют движение аппарата в соответствии с требованиями модели использования.

Методы. Математическая модель пространственного движения АНПА имеет вид нелинейной многомерной системы уравнений, параметры которой могут меняться в широком диапазоне. Традиционно для исследования динамических свойств аппарата принято разделение полной системы уравнений на подсистемы, описывающие движение в плоскостях симметрии с использованием «естественных» переменных состояния [6–8]. Принятые при этом системы координат и схемы действия сил приведены на рис. 1.

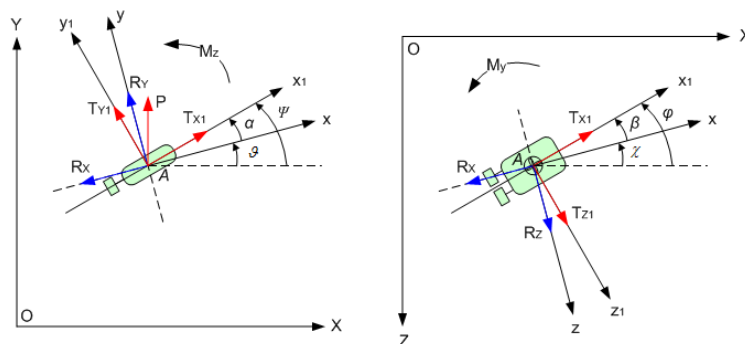


Рис. 1. Системы координат и схемы действия сил модели пространственного движения АНПА

$$\begin{aligned}
 m_x \cdot \dot{v} &= -R_x(v, \alpha) + P \cdot \sin\vartheta + T_{x1} \cdot \cos\alpha - T_{y1} \cdot \sin\alpha, \\
 m_y \cdot v \cdot \dot{\vartheta} &= R_y(v, \alpha, \psi) + P \cdot \cos\vartheta + T_{y1} \cdot \cos\alpha + T_{x1} \cdot \sin\alpha, \\
 (J_{zz} + \lambda_{66}) \cdot \dot{\psi} &= M_o \cdot \sin\psi + M_z(v, \alpha, \psi) + M_{z1}, \\
 \dot{X} &= v \cdot \cos\vartheta, \dot{Y} = -v \cdot \sin\vartheta, \psi = \vartheta + \alpha.
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 m_x \cdot \dot{v} &= -R_x(v, \beta) + T_{x1} \cdot \cos\beta - T_{z1} \cdot \sin\beta, \\
 m_z \cdot v \cdot \dot{\chi} &= R_z(v, \beta, \phi) + T_{z1} \cdot \cos\beta + T_{x1} \cdot \sin\beta, \\
 (J_{yy} + \lambda_{55}) \cdot \dot{\phi} &= M_y(v, \beta, \phi) + M_{y1}, \\
 \dot{X} &= v \cdot \cos\chi, \dot{Z} = v \cdot \sin\chi, \phi = \chi + \beta.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Приведенные уравнения движения аппарата в вертикальной (1) и горизонтальной (2) плоскостях скоростной системы координат используют обозначения, принятые в [6–7], в частности: $OXYZ$ – инерциальная (полигонная система координат); $Ax_1y_1z_1$ – система координат (СК), связанная с аппаратом; $Axyz$ – скоростная (поточная) СК, помещенная в центре масс аппарата и ориентированная осью Ax по вектору результирующей скорости v ; $m_x=(M+\lambda_{11})$, $m_y=(M+\lambda_{22})$, $m_z=(M+\lambda_{33})$, M , I_{xx} , I_{yy} , I_{zz} , λ_{ij} – масса, моменты инерции «сухого» аппарата и присоединенные массы и моменты жидкости; T_{x1} , T_{y1} , T_{z1} , M_y , M_{z1} – управляющие силы и моменты движительно-рулевого комплекса в связанной системе координат; ϑ , χ – углы подъема и поворота траектории; ϕ , ψ – углы курса и дифферента аппарата; α , β – углы атаки и дрейфа; R_x , R_y , R_z , M_y , M_z – гидродинамические силы и моменты; $M_o=\gamma \cdot U_a \cdot h_o$ – момент остойчивости; γ – удельный вес жидкости; U_a – объемное водоизмещение аппарата; h_o – метацентрическая высота; $P= \gamma \cdot U_a \cdot M \cdot g$ – остаточная плавучесть аппарата; g – ускорение свободного падения.

Максимальная нагрузка ДРК соответствует режиму установившегося движения аппарата на максимальной скорости хода с одновременной компенсацией его остаточной плавучести вертикальной составляющей гидродинамического сопротивления корпуса. При этом баланс позиционных гидродинамических сил и моментов, действующих на аппарат, с управляющими воздействиями ДРК соответствует уравнениям, полученным из (1) с учетом допущения о малости угла атаки и нулевого угла подъема траектории

$$\begin{aligned}
 -R_x(v, \alpha) + T_{x1} - T_{y1} \cdot \alpha &= 0, \\
 R_y(v, \alpha) + P + T_{y1} + T_{x1} \cdot \alpha &= 0, \\
 M_o \cdot \alpha + M_z(v, \alpha) + M_{z1} &= 0, \\
 \dot{X} = v, \dot{Y} = 0, \psi &= \alpha.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Решение приведенной системы уравнений требует определения зависимости гидродинамических моментов и сил от угла атаки для заданного значения скорости набегающего потока. Наиболее эффективным методом анализа гидродинамики АНПА является метод виртуальной продувки с использованием пакетов прикладных программ систем САЕ (Computer Aided Engineering), предназначенных для автоматизированных расчетов и испытаний аналитических моделей объектов в тех или иных заданных условиях взаимодействия с потоком жидкости. Дальнейшие расчеты производились средствами программ SolidWorks и COSMOS-FloWorks, основанных на методе конечных объемов (описание расчетной сетки) и теории Навье-Стокса, описывающей влияние потоков жидкости на элементы сетки [1, 9, 10, 11]. Ниже приведены результаты виртуальной продувки АНПА МТ-2010 «Пилигрим».

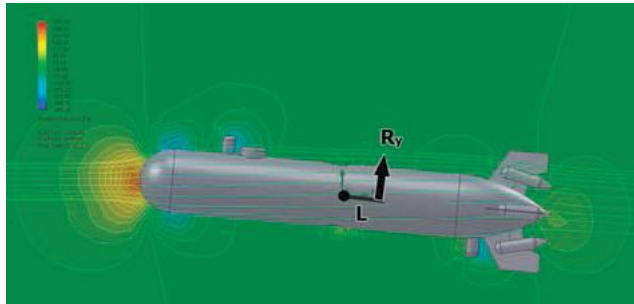


Рис. 2. Визуализированная модель АНПА МТ-2010 «Пилигрим» в поле давления набегающего потока ($v = 3 \text{ м/с}$, $\alpha = 5^\circ$)

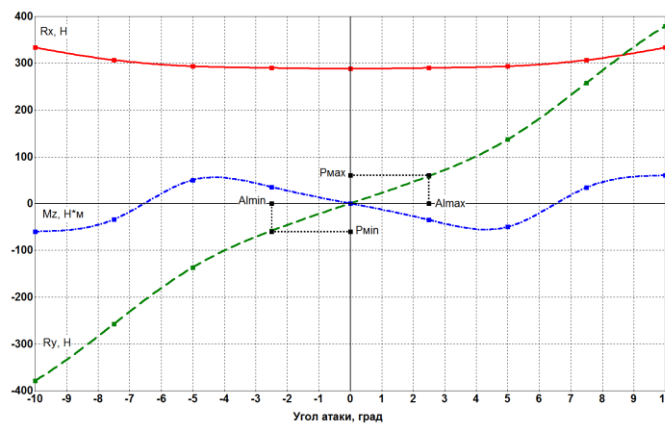


Рис. 3. Зависимости сил сопротивления АНПА МТ-2010 «Пилигрим» на скорости 3 м/с в диапазоне углов атаки $|\alpha| \leq 10^\circ$

В пределах диапазона изменения углов атаки $|\alpha| \leq 4^\circ$, необходимого для компенсации остаточной плавучести, изменяющейся в пределах $-75 \text{ Н} < P < 75 \text{ Н}$, $R_x(\alpha)$ практически постоянна, а вертикальная сила $R_y(\alpha)$ и момент $M_z(\alpha)$ могут быть достаточно точно учтены линейными зависимостями от α

$$\begin{aligned} R_x(\alpha) &\cong R_x(0) \\ R_y(\alpha) &\cong K_\alpha^y \cdot \alpha, \\ M_z(\alpha) &\cong -K_\alpha^z \cdot \alpha, \end{aligned} \quad (4)$$

где K_α^y, K_α^z – наклоны аппроксимированных зависимостей, определенных по результатам виртуальной продувки модели.

С учетом компоновочной схемы маршевых двигателей, показанной на рис. 4, управляющие воздействия определяются выражением [10]

$$\begin{aligned} T_{x1} &= (F_l + F_\Pi + F_B + F_H) \cdot \cos\delta, \\ T_{y1} &= (F_B - F_H) \cdot \sin\delta, \\ T_{z1} &= (F_\Pi - F_l) \cdot \sin\delta, \\ M_{x1} &= 0, \\ M_{y1} &= T_{z1} \cdot L_\varphi, \\ M_{z1} &= -T_{y1} \cdot L_\psi; \end{aligned} \quad (5)$$

где F_l, F_Π, F_B, F_H – тяги маршевых двигателей, L_φ, L_ψ – плечи управляющих моментов по курсу и дифференту, соответственно.

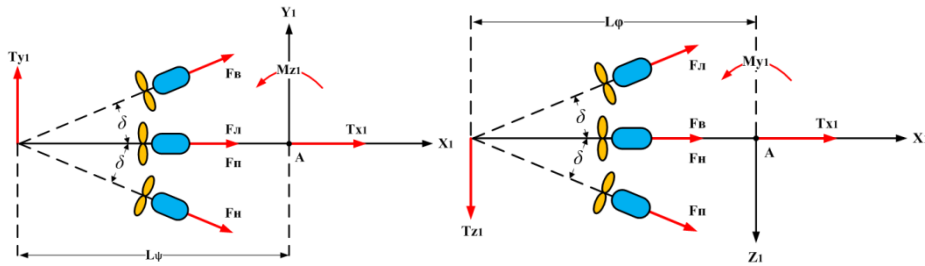


Рис. 4. Силы и моменты движительно-рулевого комплекса АНПА МТ-2010 «Пилигрим»

С учетом выражений (4) и (5) уравнение установившегося движения (3) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} -R_x(0) + T_{x1} - T_{y1} \cdot \alpha &= 0, \\ K_\alpha^y \cdot \alpha + P + T_{y1} + T_{x1} \cdot \alpha &= 0, \\ -M_o \cdot \alpha - K_\alpha^z \cdot \alpha - T_{y1} \cdot L_\psi &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Приняв допущение $R_x(0) \approx T_{x1}$, можно разрешить систему (6) относительно угла атаки

$$\alpha_6 = - \frac{P}{R_x(0) + K_\alpha^y - \frac{M_o + K_\alpha^z}{L_\psi}}, \quad (7)$$

где α_6 – угол атаки, обеспечивающий баланс моментов и сил в режиме установившегося движения. При этом требуемые для баланса тяги ДРК будут

$$T_{x6} = R_x(0) - T_{y1} \cdot \alpha_6, \quad (8)$$

$$T_{y6} = - \frac{M_o + K_\alpha^z}{L_\psi} \cdot \alpha_6.$$

В соответствии с компоновкой ДРК определяются требуемые тяги маршевых движителей

$$\begin{aligned} F_\Delta &= \frac{T_{x6}}{4 \cdot \cos \delta} - \frac{M_{y1}}{2 \cdot L_\phi \cdot \sin \delta}, \\ F_\Pi &= \frac{T_{x6}}{4 \cdot \cos \delta} + \frac{M_{y1}}{2 \cdot L_\phi \cdot \sin \delta}, \\ F_\text{в} &= \frac{T_{x6}}{4 \cdot \cos \delta} + \frac{T_{y6}}{2 \cdot \sin \delta}, \\ F_\text{н} &= \frac{T_{x6}}{4 \cdot \cos \delta} - \frac{T_{y6}}{2 \cdot \sin \delta}. \end{aligned} \quad (9)$$

После подстановки исходных данных определяется тяга наиболее загруженного движителя F_Δ необходимая для выбора электропривода.

Предварительный выбор гребного электропривода маршевого движителя заключается в определении требуемой для создания F_Δ механической мощности $N_{\text{ГВ}}$ и частоты вращения вала $n_\text{в}$. Требуемая мощность на валу движителя соответствует выражению [4]

$$N_{\text{ГВ}} = \frac{F_\Delta \cdot V_{\text{макс}}}{\eta_{\text{ГВ}}}, \quad (10)$$

где $\eta_{\text{ГВ}}$ – коэффициент полезного действия гребного винта (ГВ), $V_{\text{макс}}$ – скорость движения аппарата относительно воды. Предварительное значение частоты вращения определяется исходя из оптимальной величины относительной поступи винта $\lambda_\text{р} = 1$, соответствующей максимальному КПД винта $\eta_{\text{ГВ}} \cong 0,7 \pm 0,05$ [4, 8]

$$\lambda_p = \frac{V_{\max}}{n_{so} \cdot D} \cong 1,$$

где D – диаметр винта [м], n_{so} – частота вращения [об/с]. При выборе привода принимается частота вращения режима максимальной мощности в об/мин соответствует

$$n_b = 60 \cdot \frac{V_{\max}}{D}. \quad (11)$$

Для гидродинамического расчета параметров гребного винта необходимо определить рабочую точку внешней характеристики привода $N_b = f(n_b)$, что требует проведения его нагрузочных испытаний. Разработанный в институте стенд на базе гистерезисного тормоза позволяет снимать характеристики привода при изменении нагрузочного момента в заданном диапазоне [14–16].

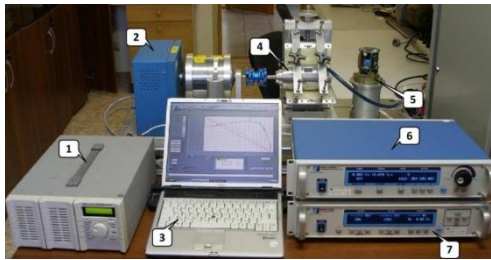


Рис. 5. Стенд для нагрузочных испытаний ГЭП: 1 – блок питания; 2 – гистерезисный тормоз HD-705-8NA-014; 3 – управляющий компьютер; 4 – ГЭП в устройстве крепления; 5 – блок управления двигателем; 6 – контроллер динамометра; 7 – анализатор мощности

Уточнение параметров ГВ заключается в итерационном поиске их значений, обеспечивающих для известных V_{\max} и n_o равенство $N_{э0} = N_{э\max}$. Момент, который должен обеспечить привод при заданных оборотах, а также создаваемая двигателем тяга и его КПД вычисляются в следующей последовательности. Сначала для выбранного сочетания параметров гребного винта (диаметр D , шаговое отношение $\xi = H/D$, число лопастей Z , дисковое отношение $v = A/Ad$, номер серии n_{ser}) прикладной программой PSOP, основанной на результатах модельных испытаний винтов в соответствии с методикой Дайдола-Джонсона [17–18], рассчитываются коэффициенты упора K_t и момента K_M гребного винта по формулам

$$K_t = \sum_i C_{ti} \cdot \lambda_p^{S_{1i}} \cdot \zeta^{T_{1i}} \cdot v^{U_{1i}} \cdot z^{V_{1i}},$$

$$K_M = \sum_j C_{Mj} \cdot \lambda_p^{S_{2j}} \cdot \zeta^{T_{2j}} \cdot v^{U_{2j}} \cdot z^{V_{2j}},$$

где $C_{1i}, S_{1i}, T_{1i}, U_{1i}, V_{1i}, C_{2j}, S_{2j}, T_{2j}, U_{2j}, V_{2j}$ – полиномиальные коэффициенты регрессионной базы данных для принятой серии винтов.

На следующем этапе, задавшись частотой вращения ГВ $n_g = n_{эn}$ и скоростью движения АНПА, вычисляется сначала относительная поступь λ_p , а затем момент сопротивления $M_{эв}$, упор F_d , требуемая мощность на валу $N_{ГВ}$ и КПД по классическим формулам [8, 13].

$$F_d = K_t(\lambda_p) \cdot \rho \cdot n_g^2 \cdot D^4,$$

$$M_{эв} = K_M(\lambda_p) \cdot \rho \cdot n_g^2 \cdot D^5,$$

$$N_{ГВ} = n_g \cdot M_{эв},$$

$$\eta_{ГВ} = T_\delta \cdot V_x / N_{эв}.$$

Блок-схема итерационного алгоритма определения параметров ГВ по заданной рабочей точке внешней характеристики привода (N_6, n_6) и требуемой тяге F_d приведена на рис. 6.

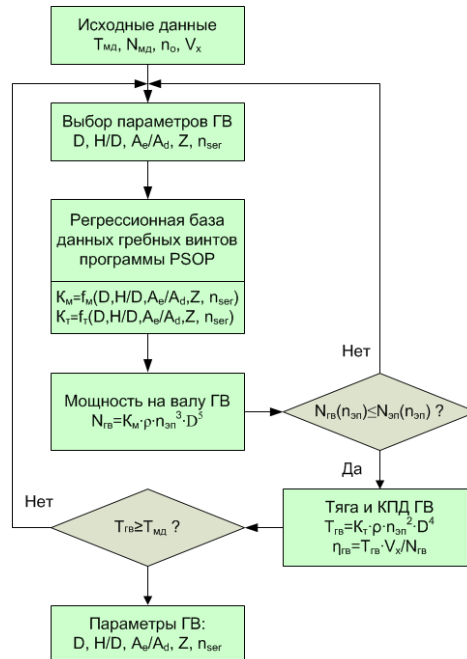


Рис. 6. Блок-схема алгоритма итерационного поиска параметров ГВ маршевого двигателя

Результаты. В качестве иллюстрации предложенного подхода была проведена оценка требований к гребному электроприводу маршевых двигателей АНПА МТ-2010 «Пилигрим».

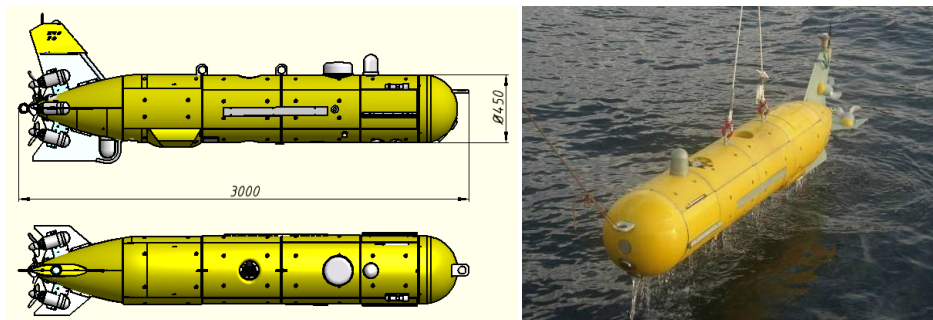


Рис. 7. Многоцелевой АНПА МТ-2010 «Пилигрим»

Исходные данные для расчета, определенные в ходе анализа результатов виртуальной продувки 3-D модели аппарата (скорость 3 м/с), а также с учетом максимального изменения его остаточной плавучести и компоновочной схемы ДРК приведены ниже.

Таблица 1

Исходные данные для оценки требований к ГЭП АНПА МТ-2010 «Пилигрим» при $V=3$ м/с

$R_x(0)$	K_α^y	K_α^z	P	δ	M_o	L_ψ	L_α
Н	Н/рад	Н/рад	Н	град	Н·м/рад	м	м
148	1375	731	60	22,5	0,70	2,0	2,0

В соответствии с выражениями (7)–(9) определены угол атаки, соответствующий балансу сил и моментов в режиме установившегося движения, управляющие тяги ДРК и нагрузка маршевых движителей.

Таблица 2

Результаты расчета загрузки маршевых движителей

α_6	T_{x6}	T_{y6}	F_L	F_H	F_B	F_H
град	Н	Н	Н	Н	Н	Н
-2,97	146	19	39,5	39,5	64,3	14,7

Далее по формуле (10) и с учетом допущения о достижимости $\eta_{ГВ} = 0,75$ были определены предварительные требования к электроприводу наиболее нагруженного (верхнего) маршевого движителя по мощности $N_{ГВ} = 257$ Вт.

Нагрузочные испытания привода на базе бесколлекторного электродвигателя 2ДБМ70 позволили определить рабочую точку внешней характеристики с максимальной достижимой мощностью ($N_{эд} = 263$ Вт, $n_{эд} = 1020$ об/мин.)

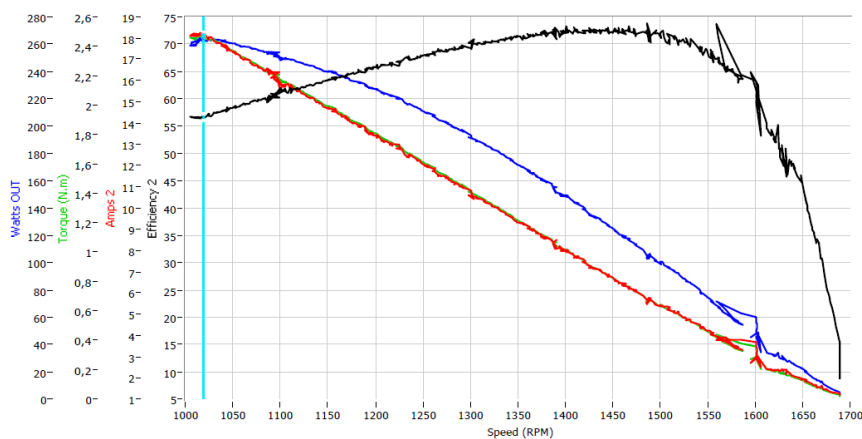


Рис. 8. Результаты нагрузочных испытаний электропривода маршевого движителя на базе 2ДБМ70

Проведенный далее гидродинамический расчет гребного винта маршевого движителя позволил определить не только его конструктивные параметры, но и уточнить эксплуатационные характеристики.

Таблица 3

Результаты гидродинамического расчета гребного винта маршевых движителей ($D=0,185$ м; $H/D=1,3$; $A_e/A_d=0,3$; $Z=3$) для $V_{max}=3$ м/с

F_d	$n_{ГВ}$	$N_{ГВ}$	$M_{ГВ}$	$\eta_{ГВ}$
Н	об/мин	Вт	Н·м	-
64,8	1020	263	2,43	0,74

Заключение. Компенсация остаточной плавучести аппарата вертикальной составляющей его гидродинамического сопротивления требует дополнительной тяги одного из маршевого движителей для создания момента по дифференту. В статье предложена математическая модель установившегося движения АНПА, на основании которой определено значение угла атаки, обеспечивающего необходимую скорость хода с компенсацией известной остаточной плавучести. Для заданной компоновочной схемы ДРК определена загрузка маршевых движителей, которая позволила сформировать предварительные требования к наиболее нагруженному электроприводу по мощности и частоте вращения. В ходе нагрузочных испытаний выбранного электропривода подходящей мощности была определена частота вращения, соответствующая максимальной мощности на его валу. В результате гидродинамического расчета гребного винта для параметров привода, выявленных в ходе нагрузочных испытаний, найдены конструктивные параметры ГВ, а также эксплуатационные характеристики маршевого движителя. Использование предложенного подхода обосновывает выбор ГЭП, обеспечивающего движение аппарата с требуемой скоростью хода и стабилизацией глубины погружения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Allotta B., Pugi L., Bartolini F., Ridolfi A., Costanzi R., Monni N., Gelli J.* Preliminary design and fast prototyping of an Autonomous Underwater Vehicle propulsion system // Proc. IMechE. Part M: Engineering for the Maritime Environment 201X. – 2013. – Vol. XX(X). – P. 1-25.
2. *Bradley A.M., Feezor M.D., Singh H., Sorrell F.Y.* Power Systems for Autonomous Underwater Vehicles // IEEE Journal of oceanic Engineering. – 2001. – Vol. 26, No. 4. – P. 526-538.
3. *Костенко В.В., Михайлов Д.Н.* Определение параметров энергосиловой установки автономного необитаемого подводного аппарата по заданной дальности хода // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3 (140). – С. 70-73.
4. *Костенко В.В., Михайлов Д.Н.* Зависимость параметров автономности подводного аппарата от энергоемкости аккумуляторной батареи // Материалы 6-й научно-технической конференции «Технические проблемы освоения мирового океана», Владивосток, 28 сентября – 2 октября 2015. – С. 97-100. – ISBN 978-5-8044-1363-2.
5. *Слижевский Н.Б., Король Ю.М., Соколик М.Г.* Гидродинамический расчет самоходных подводных аппаратов. – Николаев: УГМТУ, 2008. – 93 с.
6. *Агеев М.Д., Касаткин Б.А., Киселев Л.В. и др.* Автоматические подводные аппараты. – Л.: Судостроение, 1981. (Техника освоения океана). – 224 с.
7. *Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др.* Автономные подводные роботы: системы и технологии / под общ. ред. М.Д. Агеева; Ин-т проблем морских технологий. – М.: Наука, 2005. – 398 с.
8. *Пантов Е.Н., Махин М.Н., Шереметов Б.Б.* Основы теории движения подводных аппаратов. – Л.: Судостроение, 1973. – 209 с.
9. *Киселев Л.В., Медведев А.В.* О параметрических соотношениях гидродинамики и устойчивости движения автономного подводного робота // Подводные исследования и робототехника. – 2013. – № 1 (15). – С. 17-22.

10. Киселев Л.В., Медведев А.В. Сравнительный анализ и оптимизация динамических свойств автономных подводных роботов различных проектов и конфигураций // Подводные исследования и робототехника. – 2012. – № 1 (13). – С. 24-35.
11. Киселев Л.В., Багницкий А.В. О точности идентификации гидродинамических характеристик автономного подводного робота // Подводные исследования и робототехника. – 2015. – № 1 (19). – С. 33-39.
12. Yoerger D.R., Slotine 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.
13. Войткунский Я.И., Першиц Р.Я., Титов И.А. Справочник по теории корабля. Судовые движители и управляемость. – Л.: Судостроение, 1973. – 511 с.
14. Горнак В.Е., Костенко В.В. Расчетно-экспериментальная методика определения эксплуатационных характеристик гребного электропривода подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. – 2007. – № 2 (4). – С. 30-33.
15. Костенко В.В., Михайлов Д.Н., Найдено Н.А. Аппаратно-программные средства идентификации характеристик движителя подводного аппарата // Материалы восьмой научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – Таганрог 2013. – С. 63-70.
16. Костенко В.В., Михайлов Д.Н., Найдено Н.А. Определение параметров гребного электропривода по результатам нагрузочных и бассейновых испытаний // Материалы 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. 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.
18. Healey A.J., Rock S.M., Cody S., Miles D., Brown J.P. Toward an Improved Understanding of Thruster Dynamics for Underwater Vehicles // IEEE Journal of oceanic Engineering. – 1995. – Vol. 20, No. 4. – P. 354-361.
19. Kim J., Chung W.K. Accurate and practical thruster modeling for underwater vehicles // Journal of Ocean Engineering. – 2006. – Vol. 33. – P. 566-586.
20. Fossen T.I., Blanc M. Nonlinear Output Feedback Control of Underwater Vehicle Propellers Using Feedback Form Estimated Axial Flow Velocity // IEEE Journal of oceanic Engineering. – 2000. – Vol. 25, No. 2. – P. 241-255.

REFERENCES

1. Allotta B., Pugi L., Bartolini F., Ridolfi A., Costanzi R., Monni N., Gelli J. Preliminary design and fast prototyping of an Autonomous Underwater Vehicle propulsion system, *Proc. IMechE. Part M: Engineering for the Maritime Environment 2013*, 2013, Vol. XX(X), pp. 1-25.
2. Bradley A.M., Feezor M.D., Singh H., Sorrell F.Y. Power Systems for Autonomous Underwater Vehicles, *IEEE Journal of oceanic Engineering*, 2001, Vol. 26, No. 4, pp. 526-538.
3. Kostenko V.V., Mikhaylov D.N. Opredelenie parametrov energosilovoy ustanovki avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata po zadannoy dal'nosti khoda [Determination of parameters AUV's power plant on the set of long cruising rang], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 3 (140), pp. 70-73.
4. Kostenko V.V., Mikhaylov D.N. Zavisimost' parametrov avtonomnosti podvodnogo apparata ot energoemkosti akkumulyatornoy batarei [The dependence of the parameters of Autonomous underwater vehicle from the consumption of the battery], *Materialy 6-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tekhnicheskie problemy osvoeniya mirovogo okeana», Vladivostok, 28 sentyabrya – 2 oktyabrya 2015* [Materials of the 6th scientific-technical conference "Technical problems of world ocean exploration", Vladivostok, September 28–October 2, 2015], pp. 97-100. ISBN 978-5-8044-1363-2.
5. Slizhevskiy N.B., Korol' Yu.M., Sokolik M.G. Gidrodinamicheskii raschet samokhodnykh podvodnykh apparatov [Hydrodynamics calculation of the self-propelled submersibles]. Nikolaev: UGMTU, 2008, 93 p.
6. Ageev M.D., Kasatkin B.A., Kiselev L.V. *i dr.* Avtomaticheskie podvodnye apparaty [Unmanned Free Submersibles]. Leningrad: Sudostroenie, 1981, 224 p.

7. Ageev M.D., Kiselev L.V., Matvienko Yu.V. i dr. Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy i tekhnologii [Autonomous underwater robots: systems and technologies], ed. by M.D. Ageeva; Institute of marine technology problems. Moscow: Nauka, 2005, 398 p.
8. Pantov E.N., Makhin M.N., Sheremetov B.B. Osnovy teorii dvizheniya podvodnykh apparatov [Foundations of the theory of motion of underwater vehicles]. Leningrad: Sudostroenie, 1973, 209 p.
9. Kiselev L.V., Medvedev A.V. O parametricheskikh sootnosheniyakh gidrodinamiki i ustoychivosti dvizheniya avtonomnogo podvodnogo robota [Parametric correlations of hydrodynamics and the stability of motion of an Autonomous underwater robot], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater researches and robotics], 2013, No. 1 (15), pp. 17-22.
10. Kiselev L.V., Medvedev A.V. Sravnitel'nyy analiz i optimizatsiya dinamicheskikh svoystv avtonomnykh podvodnykh robotov razlichnykh proektov i konfiguratsiy [Comparative analysis and optimization of dynamic properties of Autonomous underwater robots of various designs and configurations], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater researches and robotics], 2012, No. 1 (13), pp. 24-35.
11. Kiselev L.V., Bagnitskiy A.V. O tochnosti identifikatsii gidrodinamicheskikh kharakteristik avtonomnogo podvodnogo robota [About the accuracy of the identification of the hydrodynamic parameters of Autonomous underwater robot], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater researches and robotics], 2015, No. 1 (19), pp. 33-39.
12. Yoerger D.R., Slotine 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, pp. 167-178.
13. Voytkunskiy Ya.I., Pershits R.Ya., Titov I.A. Spravochnik po teorii korablya. Sudovye dvizhiteli i upravlyaemost' [Guide to the theory of ship. Ship propellers and maneuverability]. Leningrad: Sudostroenie, 1973, 511 p.
14. Gornak V.E., Kostenko V.V. Raschetno-eksperimental'naya metodika opredeleniya ekspluatatsionnykh kharakteristik grebnogo elektroprivoda podvodnogo apparata [Calculation-experimental method of determining operational characteristics of the propeller drive underwater vehicle], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater researches and robotics], 2007, No. 2 (4), pp. 30-33.
15. Kostenko V.V., Mikhaylov D.N., Naydenko N.A. Apparato-programmnye sredstva identifikatsii kharakteristik dvizhitelya podvodnogo apparata [Hardware and software identify the characteristics of propulsion underwater vehicle], *Materialy vos'moy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Proceedings of the eighth scientific-practical conference "Advanced systems and control problems"]. Taganrog 2013, pp. 63-70.
16. Kostenko V.V., Mikhaylov D.N., Naydenko N.A. Opredelenie parametrov grebnogo elektroprivoda po rezul'tatam nagruzochnykh i basseynovykh ispytaniy [Determination of parameters of propeller electric drive with the results of stress tests and basin], *Materialy 5-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tekhnicheskie problemy osvoeniya mirovogo okeana», Vladivostok, 30 sentyabrya – 4 oktyabrya 2013* [Materials of 5-th scientific and technical conference "Technical problems of world ocean exploration", Vladivostok: September 30 – October 4, 2013], pp. 389-395. ISBN 978-5-8044-1409-3.
17. 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.
18. Healey A.J., Rock S.M., Cody S., Miles D., Brown J.P. Toward an Improved Understanding of Thruster Dynamics for Underwater Vehicles, *IEEE Journal of oceanic Engineering*, 1995, Vol. 20, No. 4, pp. 354-361.
19. Kim J., Chung W.K. Accurate and practical thruster modeling for underwater vehicles, *Journal of Ocean Engineering*, 2006, Vol. 33, pp. 566-586.
20. Fossen T.I., Blanc M. Nonlinear Output Feedback Control of Underwater Vehicle Propellers Using Feedback Form Estimated Axial Flow Velocity, *IEEE Journal of oceanic Engineering*, 2000, Vol. 25, No. 2, pp. 241-255.

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

Костенко Владимир Владимирович – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки 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.

Михайлов Денис Николаевич – e-mail: denmih@marine.febras.ru; Лаборатория исполнительных устройств и систем телеуправления; с.н.с.

Нечаев Виталий Дмитриевич – e-mail: denmih@marine.febras.ru; Лаборатория исполнительных устройств и систем телеуправления; инженер.

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: +74232432578; Laboratory actuating devices and remote control systems; cand. of eng, sc.; laboratory head.

Mikhailov Denis Nikolaevich – e-mail: denmih@marine.febras.ru; Laboratory actuating devices and remote control systems; the senior researcher.

Nechaev Vitaliy Dmitrievich – e-mail: denmih@marine.febras.ru; Laboratory actuating devices and remote control systems; engineer.

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

УДК 621.31

DOI 10.18522/2311-3103-2017-1-108120

В.А. Герасимов, М.В. Красковский, А.Ю. Филоженко

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОГО
ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ АВТОНОМНОГО
НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА**

Определена структура системы бесконтактной передачи электроэнергии на борт автономного необитаемого подводного аппарата для осуществления зарядки его аккумуляторных батарей при подводном базировании. Отмечены преимущества такого способа зарядки и показаны особенности режимов работы автономного инвертора и высокочастотного трансформатора, который выполнен с разделяющимися первичной и вторичной частями. Наличие немагнитного зазора между обмотками является следствием особенности конструкции и приводит к увеличенной намагничивающей составляющей тока трансформатора и повышенному выходному току инвертора. Поставлена задача повышения эффективности системы бесконтактной передачи электроэнергии путем токовой разгрузки силовых транзисторов автономного инвертора за счет компенсации индуктивной составляющей его выходного тока. Рассмотрены известные технические решения и обосновано применения для решения поставленной задачи последовательной резонансной цепи из индуктивности и конденсатора, включаемых параллельно первичной обмотке трансформатора. Выполнено математическое моделирование системы с подключенной резонансной цепью и определены рекомендации по выбору параметров и режимов работы, приводящие к решению поставленной задачи. Анализ диаграмм сигналов, полученных при математическом моделировании, позволил сформулировать требования, обеспечивающие «мягкое переключение» как при включении, так и при выключении силовых ключей автономного инвертора. Найденные решения позволили минимизировать потери мощности в инверторе, уменьшить нагрев его элементов и повысить надежность и эффективность работы, сводящуюся к осуществлению зарядки аккумуляторных батарей аппарата за