

<http://dx.doi.org/10.15589/evn20140305>

УДК 62-83:629.584

В 72

SYNTHESIS OF MATHEMATICAL MODEL MOTIVE-STEERING COMPLEX OF SUBMARINE VEHICLE AS MANAGEMENT OBJECT

СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВИЖИТЕЛЬНО-РУЛЕВОГО КОМПЛЕКСА ПОДВОДНОГО АППАРАТА КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Serhii M. Volianskyi

ffogres@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-7922-0441

С. М. Волянский,

ассист.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

Abstract. Mechanical descriptions of barounloaded rowing electric motor have been obtained as a management object in all temperature range of exploitation of submarine vehicle for different filling dielectrics. Expediency of account of influence of temperature and type of working liquid of barounloaded rowing electric motor is well-proven at the synthesis of control system of motive steering complex of submarine vehicle. The mathematical model of rectilinear platforming of submarine vehicle, allowing one to investigate the method of computer design the rectilinear platforming of submarine vehicle in the conditions of influence of environment, is synthesized. Simulink-model is worked out is a model of rectilinear platforming of submarine vehicle. The design of dynamic descriptions of motion of submarine vehicle is conducted at different powers of feed of march electric motors.

Keywords: engine helm complex; submarine vehicle; mathematical model; barounloaded electric motor.

Аннотация. Получены механические характеристики бароразгруженного гребного электродвигателя как объекта управления во всем температурном диапазоне эксплуатации подводного аппарата для различных заполняющих диэлектриков. Синтезирована математическая модель горизонтального прямолинейного движения подводного аппарата, позволяющая исследовать методом компьютерного моделирования горизонтальное прямолинейное движение подводного аппарата в условиях влияния внешней среды.

Ключевые слова: движительно-рулевой комплекс; подводный аппарат; математическая модель; бароразгруженный электродвигатель.

Анотація. Отримані механічні характеристики баророзвантаженого гребного електродвигуна як об'єкта керування в усьому температурному діапазоні експлуатації підводного апарата для різних заповнюючих діелектриків. Синтезовано математичну модель горизонтального прямолінійного руху підводного апарата, яка дозволяє досліджувати методом комп'ютерного моделювання горизонтальний прямолінійний рух підводного апарата в умовах впливу зовнішнього середовища.

Ключові слова: рушійно-кермовий комплекс; підводний апарат; математична модель; баророзвантажений електродвигун.

REFERENCES

- [1] Ageev M.D., Kiselev L.V., Matvienko Yu.V. et al. *Avtonomnye podvodnye roboty. Sistemy i tekhnologii* [Autonomous submarine robots. Systems and technologies]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 400 p.
- [2] Ageev M.D. *Uproshchennaya metodika rascheta dvizhiteley dlya APA* [Simplified methodology of calculation of propulsion devices for ASA]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 1995. pp. 33–49.
- [3] Gostev V.I. *Sintez nechetkikh regulyatorov sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Synthesis of unclear regulators of the systems of automatic control]. Kyiv, Radioamator Publ., 2003. 512 p.
- [4] Dyakonov V.P. *MATLAB 6.6 SPI/7 + Simulink 5/6 v matematike i modelirovanii* [MATLAB 6.6 SPI/7 Simulink 5/6 in Mathematics and simulation. Series «Library of the Professional»]. Moskva: SOLON-Press Publ., 2005. 576 p.
- [5] Zaychenko Yu.P. *Osnovy proektuvannya intelektualnykh sistem* [Bases of planning of the intellectual systems]. Kyiv, Vidavnicnyi dim «Slovo» Publ., 2004. 352 p.
- [6] Zarubin V.S. *Matematicheskoe modelirovanie v tekhnike* [Mathematical design is in engineering]. Moscow, Izd-vo MGTU Publ., 2001. 496 p.

- [7] Korol Yu.M. Postroenie matematicheskoy modeli dlya avtomatizirovannogo proektirovaniya podrulivayushchikh ustroystv podvodnykh apparatov [Construction of mathematical model for the automated planning of taxiing devices of submarine vehicles]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK* [Collection of Scientific Publications of NUS], 2005, no. 3, pp. 20–30.
- [8] Korol Yu.M. *Vliyanie gidrodinamicheskikh poter na mekhanicheskie kharakteristiki kapsulirovannykh upravlyaemykh asinkhronnykh dvigateley podvodnykh apparatov* [Influence of hydrodynamic losses on mechanical descriptions capsule of the guided asynchronous engines of submarine vehicles]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK* [Collection of Scientific Publications of NUS], 2004, no. 6, pp. 15–24.
- [9] Blintsov V.S., Magula V.E. *Proektirovanie samokhodnykh privyaznykh podvodnykh sistem* [Planning of the self-propelled tethered underwater systems]. Kyiv, Naukova dumka, Publ., 1997. 140 p.
- [10] Lukomskiy Yu.A., Chugunov V.S. *Sistemy upravleniya morskimi podvizhnymi obektami* [Control system by marine movable objects]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1988. 272 p.
- [11] *Spravochnik po teorii korablya: V 3 t. Pod red. Ya.I. Voytkunskogo* [Guide on the Ship Theory: in 3 v. Edition by Ya.I. Voytkunskyi]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1985, vol. 1. 768 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время для проектирования подводных аппаратов (ПА) с необходимыми параметрами используют различные подходы, которые часто носят эмпирический характер [1, 2]. Для создания совершенных ПА строят сложные исследовательские установки, проводят множество измерений, для обработки данных привлекают квалифицированный персонал – все это требует существенных финансовых затрат. Таких недостатков лишен математический подход к решению данной задачи.

Метод математического моделирования является наиболее распространенным методом исследования морских подвижных объектов, так как отличается высокой точностью и практически неограниченными возможностями по учету нелинейностей любого характера. Исследования, проведенные с помощью математической модели, нередко называют экспериментом на модели [5, 6].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Анализ публикаций, посвященных разработкам математических моделей управляемого движения ПА [6, 9, 10], показывает, что эта проблема не потеряла своей актуальности до настоящего времени. Однако, с практической точки зрения, в современных условиях, благодаря развитию вычислительной техники, программного обеспечения, методов математического описания, целесообразно не разрабатывать новую, а выбирать из уже имеющихся моделей ту, что удовлетворяет требованиям решаемой задачи.

Сегодня в технической литературе все большее внимание уделяется программе реализации различных математических моделей с использованием современных математических пакетов, таких как MATLAB, MathCAD, PSPICE [3–5], достоинствами которых являются отсутствие трудоемкой реализации вычислительных методов, сокращение времени работы, использование встроенных математических методов и функций.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – синтез математической модели движительно-рулевого комплекса при горизонтальном прямолинейном движении подводного аппарата.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Математическая модель движительно-рулевого комплекса (ДРК) ПА составлена на основании обобщенной структурной схемы ДРК ПА как объекта управления, представленной на рис 1.

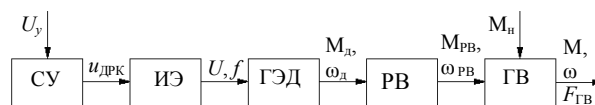


Рис. 1. Обобщенная структурная схема ДРК ПА как объекта управления: система управления (СУ), гребной электродвигатель (ГЭД) с полупроводниковым управляемым источником электроэнергии (ИЭ), редуктор и валопровод (РВ), гребной винт в конусной насадке (ГВ)

Схема включает в себя нелинейные модели автономно работающих двигателей (гребных винтов), которые получают механическую энергию от соответствующих гребных электрических двигателей через валопровод и механические редукторы. К особенностям математического моделирования таких систем можно отнести необходимость учета дополнительных потерь механической энергии двигателей из-за их работы в среде жидкого диэлектрика и корректного моделирования нелинейных характеристик гребных винтов на всем диапазоне их угловой скорости как существенно нелинейных гидродинамических объектов.

В качестве полупроводникового управляемого источника электроэнергии используется регулируемый источник напряжения (РН), а в качестве гребного электродвигателя – бароразгруженный электродвигатель постоянного или переменного рода тока (ЭД). Структурная схема, используемая для построения математической модели ДРК ПА, приведена на рис. 2.

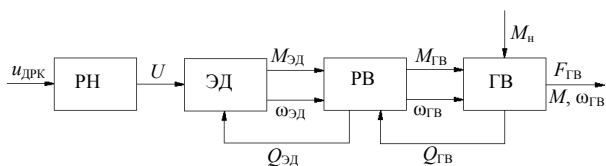


Рис. 2. Структурная схема ДРК ПА

На рис. 2 обозначены: $u_{\text{ДРК}}$ – сигнал задания РН; U – напряжение питания; $M_{\text{ЭД}}$ – момент на валу электродвигателя; $\omega_{\text{ЭД}}$ – угловая скорость вращения вала (ротора) электродвигателя; $Q_{\text{ЭД}}$ – тормозной момент ЭД; $M_{\text{ГВ}}$ – момент, который передается от РВ на ГВ; $\omega_{\text{ГВ}}$ – угловая скорость вращения ГВ; $Q_{\text{ГВ}}$ – тормозной момент ГВ; $F_{\text{ГВ}}$ – упор ГВ; M_n – момент нагрузки на валу ЭД; M – момент, развиваемый ГВ. Блоки РН, ЭД, РВ и ГВ содержат уравнения, которые описывают работу этих элементов. Блок СУ заменен сигналом $u_{\text{ДРК}}$.

В данной работе используется упрощенная структурная схема ДРК (рис. 3), в которой блоки РН и РВ заменены коэффициентами, равными единице.

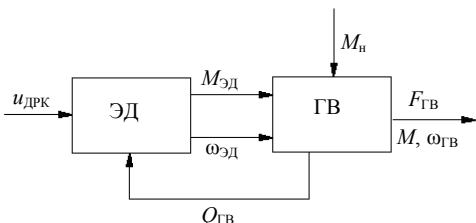


Рис. 3. Упрощенная структурная схема ДРК ПА

В обобщенном виде уравнения работы ЭД любого рода тока можно описать уравнением

$$M_{\text{дин}} = M_{\text{ЭД}} - M_n, \quad (1)$$

где $M_{\text{дин}}$ – динамический момент ЭД; $M_{\text{ЭД}} = c\Phi i/k_p$ – электромагнитный момент ЭД.

В подводной технике используются бароразгруженные электродвигатели, в которых внутреннее пространство заполнено жидким диэлектриком, где вращается ротор [7, 8]. Момент трения ротора ЭД о жидкий диэлектрик существенно возрастает при больших скоростях вращения, поэтому им нельзя пренебрегать. С учетом бароразгрузки ЭД главное уравнение математической модели (1) принимает вид

$$M_{\text{дин}} = M_{\text{ЭД}} - M_n - Q_g, \quad (2)$$

где Q_g – гидродинамический момент сопротивления вращения ротора в жидком диэлектрике, заполняющем ЭД,

$$Q_g = 4\mu\pi r^3 \omega_{\text{ЭД}} \left(\frac{L_r}{r} + \frac{L_r}{2\delta_1} + \frac{r}{4\delta_2} \right), \quad (3)$$

μ – динамический коэффициент вязкости жидкого диэлектрика; L_r , r – длина и радиус ротора; δ_1 – зазор между ротором и статором; δ_2 – зазор между торцевыми поверхностями ротора и крышками ЭД.

Для создания обобщенной математической модели ДРК ПА с бароразгруженным ЭД любого рода

тока и с учетом $Q_{\text{ГВ}} = M_n$ необходимо преобразовать уравнение (2) в вид

$$M_{\text{дин}} = M_{\text{ЭД}} - M_n - Q_g - Q_{\text{ГВ}} \quad (4)$$

и дополнить его уравнениями ГВ [7, 11]:

$$Q_{\text{ГВ}} = \begin{cases} \frac{k_Q \rho D_{\text{ГВ}}^5}{4\pi^2} \left(\frac{\omega_{\text{ЭД}}}{i} \right)^2 & \text{при } J \in [-1; 1]; \\ k_q \rho D_{\text{ГВ}}^3 \vartheta_{\text{ПА}}^2 & \text{при } J^{-1} \in (-1; 1); \end{cases} \quad (5)$$

$$F_{\text{ГВ}} = \begin{cases} \frac{k_F \rho D_{\text{ГВ}}^4}{4\pi^2} \left(\frac{\omega_{\text{ЭД}}}{i} \right)^2 & \text{при } J \in [-1; 1]; \\ k_f \rho D_{\text{ГВ}}^2 \vartheta_{\text{ПА}}^2 & \text{при } J^{-1} \in (-1; 1); \end{cases} \quad (6)$$

$$J = \frac{2\pi \vartheta_{\text{ПА}}}{\omega_{\text{ЭД}} D_{\text{ГВ}}}, \quad (7)$$

где $\vartheta_{\text{ПА}}$ – проекция вектора скорости перемещения ДРК относительно воды на ось прямого хода ДРК; $D_{\text{ГВ}}$ – диаметр ГВ; $Q_{\text{ГВ}}$ – тормозной момент ГВ; $k_Q = f(J)$ и $k_q = f(J^{-1})$ – безразмерные коэффициенты, характеризующие момент гребного винта; ρ – удельная плотность воды; $F_{\text{ГВ}}$ – движительная сила (упор) ГВ; $k_F = f(J)$ и $k_f = f(J^{-1})$ – безразмерные коэффициенты, характеризующие упор ГВ; J – относительный шаг ГВ; J^{-1} – шаг гребного винта при реверсе [11]. Коэффициенты k_Q, k_q, k_F, k_f – нелинейные, определяются из графических зависимостей, приведенных в [11].

Тормозной гидродинамический момент Q_g зависит линейно от угловой скорости вращения вала электродвигателя и нелинейно от температуры рабочей жидкости и свойств самой жидкости. Исходя из этого, формулу (3) можно представить в виде

$$Q_g(t, D_r, \omega_{\text{ЭД}}) = K_q(t, D_r) \omega_{\text{ЭД}},$$

где $K_q(t, D_r) = 4\mu\pi r^3 \left(\frac{L_r}{r} + \frac{L_r}{2\delta_1} + \frac{r}{4\delta_2} \right)$ – коэффициент гидродинамических потерь.

Зависимости коэффициента K_q от температуры и вида рабочей жидкости (диэлектрика) представлены на рис. 4, а–в.

Зависимости для анилина, ацетона, бутанола, воды дистиллированной, ксилола, толуола, глицерина построены расчетным путем. Зависимости для этанола, масла И12А, Т750 построены расчетным путем (гладкая линия) и подтверждены экспериментальными данными (маркер «звездочка»).

Суть эксперимента состоит в снятии механических характеристик асинхронного бароразгруженного электродвигателя мощностью 250 Вт без диэлектрика («всухую») и заполненного диэлектриком при различных рабочих температурах с последующим вычислением коэффициента K_q по формуле

$$K_q = \frac{(M_{\text{ЭДсух}} - M_{\text{ЭДжидк}})}{\omega},$$

где $M_{ЭД\text{ сух}}$ – момент на валу бароразгруженного ЭД без диэлектрика («всухую»); $M_{ЭД\text{ диэл}}$ – момент на валу бароразгруженного ЭД с диэлектриком.

Как видно из рис. 4, экспериментальные данные имеют расхождение с расчетными в пределах 10...11 %.

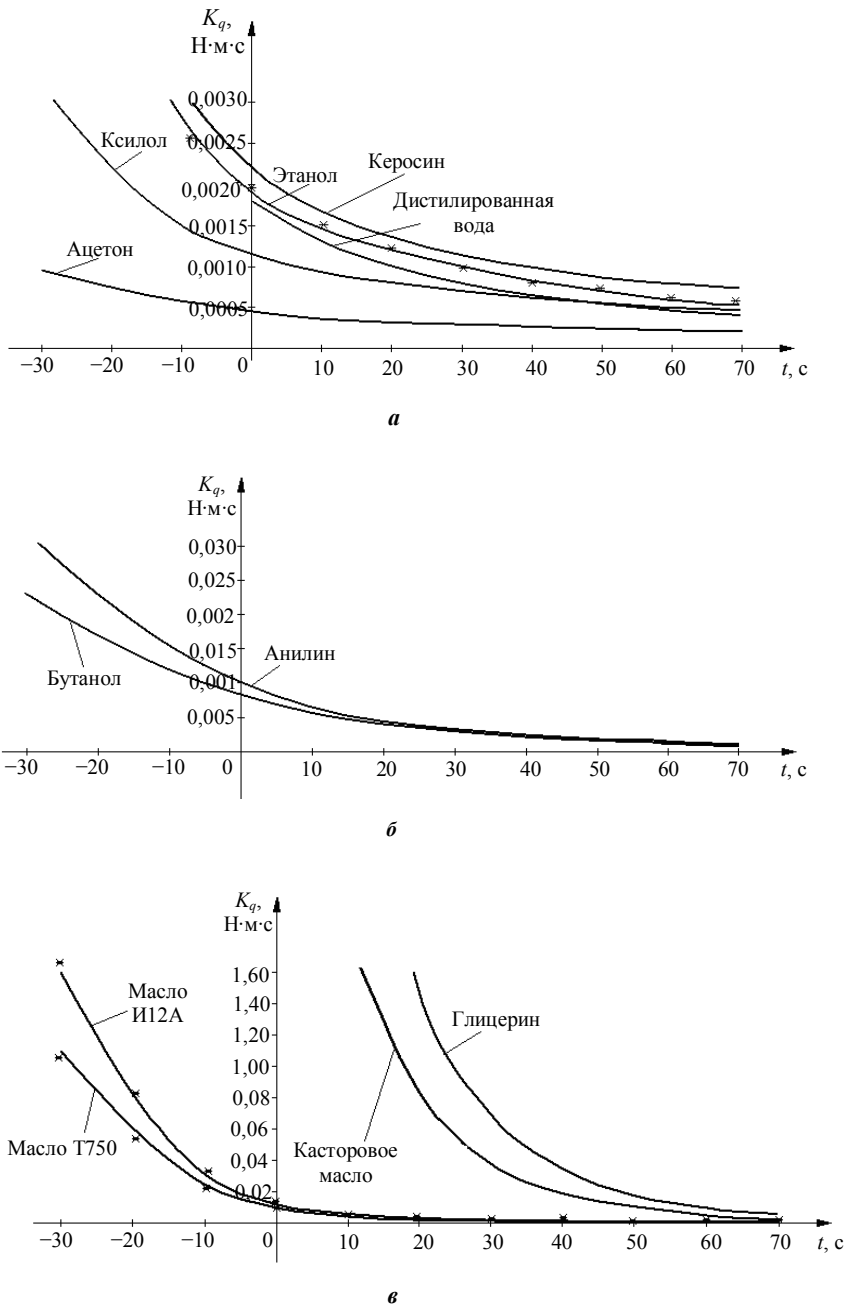


Рис. 4. Зависимости коэффициента K_q от температуры и вида рабочей жидкости (диэлектрика)

С помощью полученных на рис. 4 зависимостей K_q построены поверхности механических характеристик асинхронного бароразгруженного двигателя мощностью 250 Вт, используемого в подводном аппарате «Софокл», при различных температурах и видах рабочих жидкостей (рис. 5, а–г).

При проецировании поверхностей механических характеристик асинхронного бароразгруженного электродвигателя на плоскость получены изображе-

ния механических характеристик ЭД в общепринятом виде (рис. 6 для масла И12А).

Из рис. 5 и 6 видно, что механическая характеристика асинхронного бароразгруженного электродвигателя существенно зависит от температуры и вида рабочей жидкости, поэтому необходимо учитывать влияние температуры и вида рабочей жидкости при синтезе систем управления ДРК ПА.

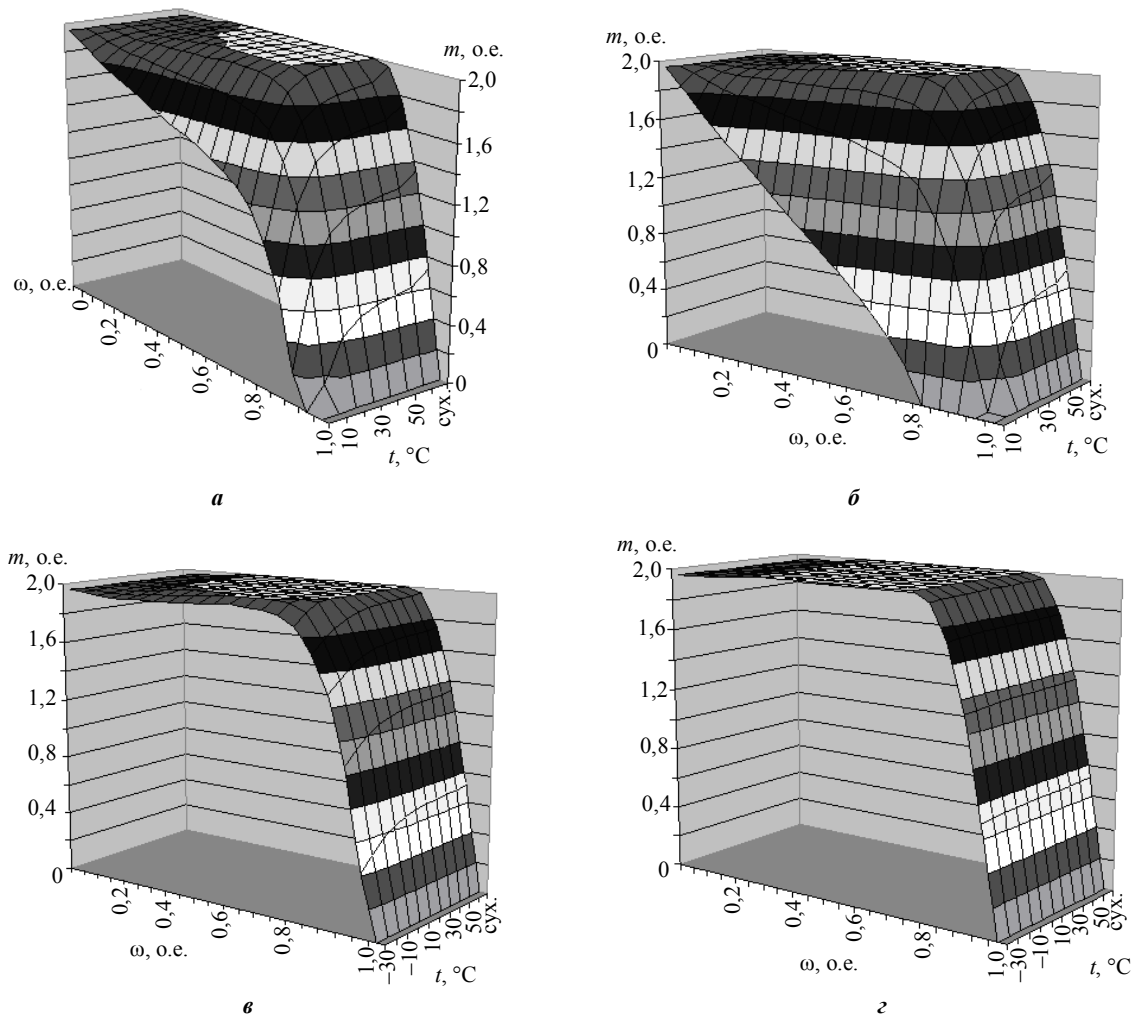


Рис. 5. Поверхности механических характеристик асинхронного бароразгруженного электродвигателя мощностью 250 Вт в зависимости от температуры и вида рабочей жидкости: а – масло И12А; б – масло Т750; в – анилин; г – этанол

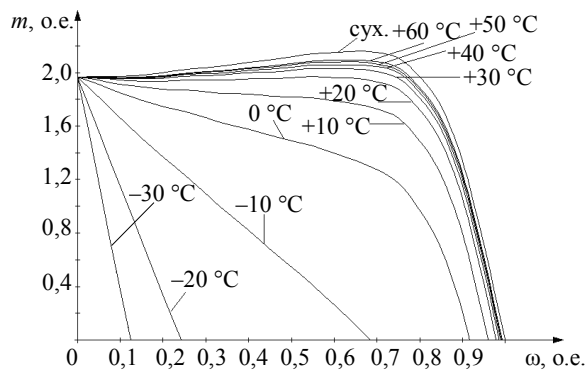


Рис. 6. Проекция поверхности механических характеристик асинхронного бароразгруженного электродвигателя мощностью 250 Вт, наполненного маслом И12А, при различных температурах

Разработанная Simulink-модель представлена на рис. 7.

Блок «Task» выполняет функцию задания входного сигнала для системы. Оператор самостоятельно выбирает необходимый вариант реализации сигналов – ступенчатые, синусоидальные, периодические, по заданной программе.

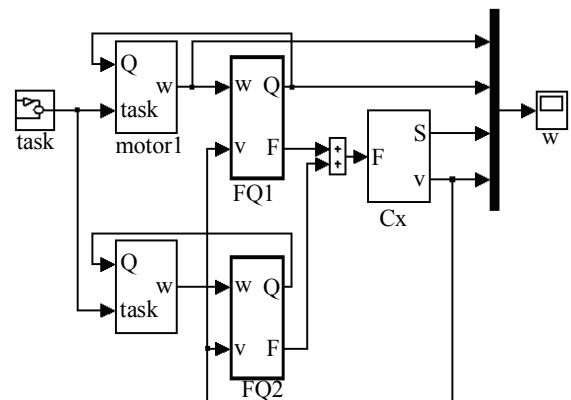


Рис. 7. Общий вид Simulink-модели горизонтального прямолинейного движения ПА

В блоках «FQ1» и «FQ2» (рис. 8) производится аппроксимация безразмерных динамических характеристик гребного винта K_f и K_{ω} , K_f и K_{ω} по заранее заданным в табличном виде функций от относительного шага гребного винта J . Далее вычисляется упор и тормозной момент винта и передаются для дальнейшей

обработки в блоке двигателя и в блоке расчета скорости движения ПА.

Блоки «motor1» и «motor2» моделируют работу машины переменного тока, получающей питание от регулируемого источника напряжения с ШИМ.

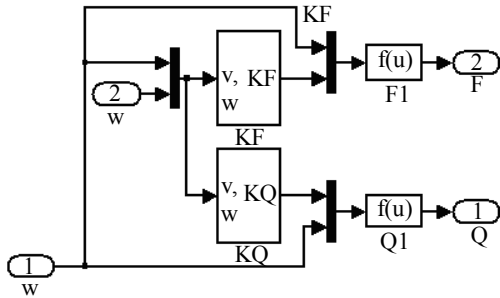


Рис. 8. Блок вычисления упора и тормозного момента гребного винта

В блоке «Сх» (рис. 9) производится расчет скорости движения ПА и его пройденного пути.

Блок «w» служит для вывода на экран графиков скорости ПА, пути, пройденного ПА, угловой скорости ГВ и создаваемого ими тормозного момента.

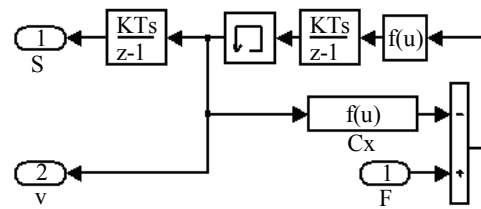


Рис. 9. Блок расчета скорости движения ПА и его пройденного пути

Проверка точности разработанной Simulink-модели горизонтального прямолинейного движения ПА производилась путем сравнения рассчитанных с помощью ее данных с экспериментальными. Экспериментальные данные получены при исследовании горизонтального прямолинейного движения подводного аппарата «Софокл» в испытательном бассейне Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова. Условия моделирования на Simulink-модели идентичны условиям проведения эксперимента в испытательном бассейне.

Результаты оценки точности моделирования прямолинейного движения ПА представлены на рис. 10.

Как видно из графиков (рис. 10), погрешность моделирования горизонтального прямолинейного движения ПА не превышает 25 %, что на 5...10 % ниже известных подобных экспериментов [10, 11].

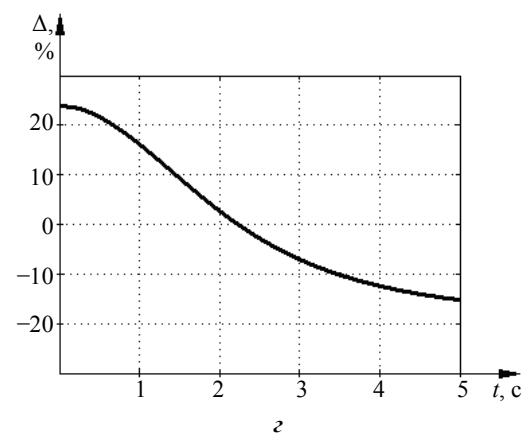
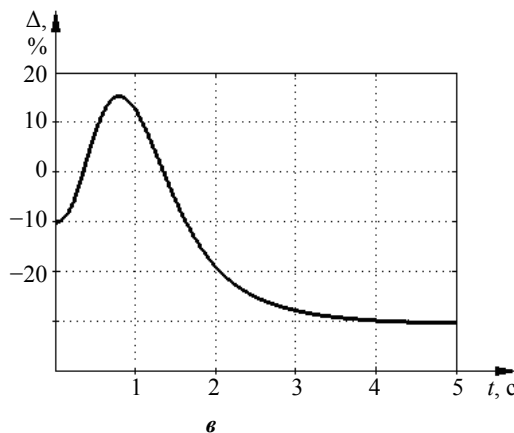
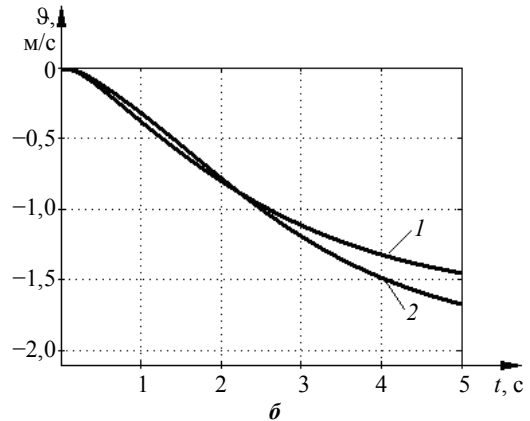
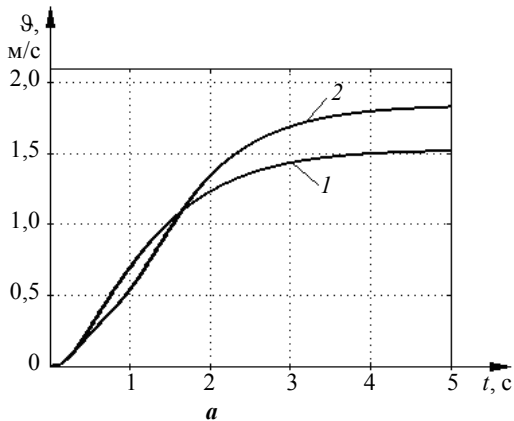


Рис. 10. Результаты оценки точности моделирования горизонтального прямолинейного движения ПА: а, б – скорость горизонтального прямолинейного движения ПА при прямом и обратном ходе (1 – моделирование; 2 – эксперимент); в, з – погрешность моделирования

Полученная погрешность позволяет говорить о достоверности проведенных исследований.

При малых скоростях движения ПА точность моделирования достигает максимальной погрешности и имеет знакопеременный нелинейный характер. Это объясняется тем, что безразмерные динамические характеристики гребных винтов K_F и K_Q , K_J и K_g при малых скоростях прямолинейного движения ПА имеют значительную нелинейность, которая затрудняет их аппроксимацию с высокой точностью.

Таким образом, разработанная Simulink-модель горизонтального прямолинейного движения ПА является работоспособной, адекватной, что дает возможность использовать ее для исследования эффективности различных типов регуляторов в системе управления ДРК-ПА и получения необходимых характеристик электроприводов любого рода тока.

ВЫВОДЫ

Получены механические характеристики бароразгруженного гребного электродвигателя как

объекта управления во всем температурном диапазоне эксплуатации подводного аппарата для различных заполняющих диэлектриков, что позволяет строить достоверные математические модели движительно-рулевых комплексов и использовать их в системах управления самоходной подводной техники.

Доказана целесообразность учета влияния температуры и вида рабочей жидкости бароразгруженного гребного электродвигателя при синтезе систем управления ДРК ПА.

Синтезирована математическая модель горизонтального прямолинейного движения ПА, разработана ее Simulink-модель. Проведено моделирование динамических характеристик движения ПА при различных мощностях питания маршевых электродвигателей. Погрешность моделирования горизонтального прямолинейного движения ПА не превышает 25 %, что позволяет говорить о достоверности синтезированной математической модели.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Автономные подводные роботы. Системы и технологии [Текст] / М. Д. Агеев, Л. В. Киселев, Ю. В. Матвиенко [и др.] / под ред. М. Д. Агеева. – М. : Наука, 2005. – 400 с.
- [2] Агеев, М. Д. Упрощенная методика расчета движителей для АПА [Текст] / М. Д. Агеев // Подводные роботы и их системы. – Владивосток : Дальнаука, 1995. – С. 33–49.
- [3] Гостев, В. И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления [Текст] / В. И. Гостев. – К. : Радиоаматор, 2003. – 512 с.
- [4] Дьяконов, В. П. MATLAB 6.6 SPI/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании [Текст] / В. П. Дьяконов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с.
- [5] Зайченко, Ю. П. Основы проектирования интеллектуальных систем [Текст] : навч. посіб. / Ю. П. Зайченко. – К. : Вид. дім «Слово», 2004. – 352 с.
- [6] Зарубин, В. С. Математическое моделирование в технике [Текст] / под ред. В. С. Зарубина и А. П. Крищенко. – М. : МГТУ, 2001. – 496 с.
- [7] Король, Ю. М. Построение математической модели для автоматизированного проектирования подруливающих устройств подводных аппаратов [Текст] / Ю. М. Король // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2005. – № 3 (402). – С. 20–30.
- [8] Король, Ю. М. Влияние гидродинамических потерь на механические характеристики капсулированных управляемых асинхронных двигателей подводных аппаратов [Текст] / Ю. М. Король // Сб. науч. трудов. – Николаев : НУК, 2004. – № 6. – С. 15–24.
- [9] Проектирование самоходных привязных подводных систем [Текст] / В. С. Блинцов, В. Э. Магула. – К. : Наукова думка, 1997. – 140 с.
- [10] Системы управления морскими подвижными объектами [Текст] : учебник / Ю. А. Лукомский, В. С. Чугунов. – Л. : Судостроение, 1988. – 272 с.
- [11] Справочник по теории корабля [Текст] : в 3 т. / под ред. Я. И. Войткунского. – Л. : Судостроение, 1985. – Т. 1. – 768 с.

© С. М. Волянський

Надійшла до редколегії 13.11.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК д-р техн. наук, проф. В. І. Локарев

Статтю розміщено у Віснику НУК № 3, 2014