

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2706909

Способ идентификации гидродинамических параметров тела

Патентообладатель: *федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет ИТМО" (Университет ИТМО) (RU)*

Авторы: *Алышев Александр Сергеевич (RU),
Мельников Виталий Геннадьевич (RU)*

Заявка № 2018142092

Приоритет изобретения 28 ноября 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 21 ноября 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 28 ноября 2038 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев





**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01M 10/00 (2019.08)

(21)(22) Заявка: **2018142092, 28.11.2018**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
28.11.2018

Дата регистрации:
21.11.2019

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: **28.11.2018**

(45) Опубликовано: **21.11.2019** Бюл. № 33

Адрес для переписки:

**197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр.,
49, Университет ИТМО, ОИС и НТИ**

(72) Автор(ы):

**Альшев Александр Сергеевич (RU),
Мельников Виталий Геннадьевич (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования "Национальный
исследовательский университет ИТМО"
(Университет ИТМО) (RU)**

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: **RU 2627023 C1 02.08.2017. RU
2436055 C2 10.12.2011. JP 2000111436 A
21.04.2000.**

(54) **Способ идентификации гидродинамических параметров тела**

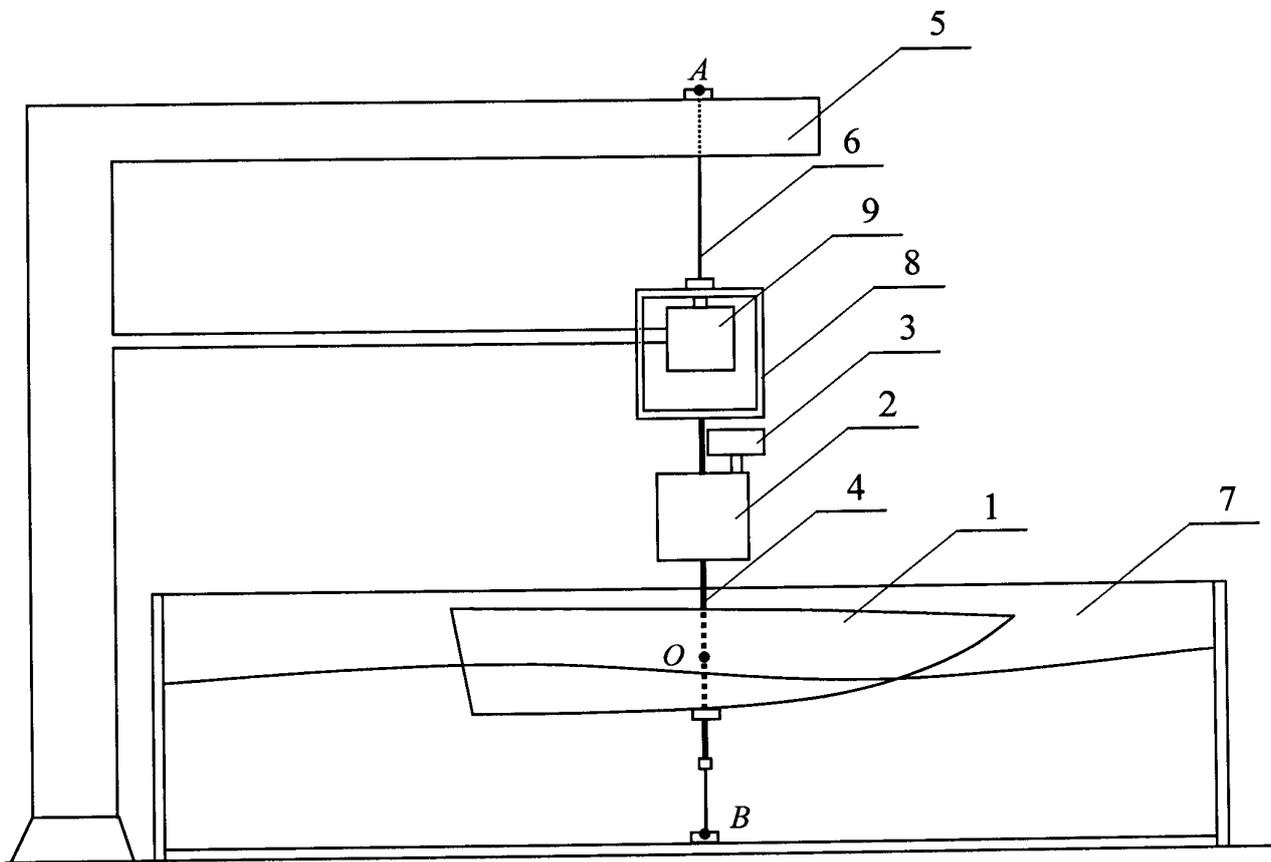
(57) Реферат:

Изобретение относится к области гидродинамики, измерительной технике, лабораторным установкам, судостроению. Способ заключается в том, что телу в виде корпуса судна, погруженному в жидкость по ватерлинию, или с заданной осадкой, с установленным на корпусе судна управляемым электродвигателем с осесимметричным маховиком с вертикальной осью вращения и упругим закручиваемым стержнем сообщают полупрограммное неравномерное реверсивно-симметричное вращательное движение относительно вертикальной оси, содержащее этап замедленного замераемого вращения на ограниченном угловом интервале и этап замераемого ускоренного вращения в обратном

направлении, симметричного первому этапу. На обратном вращении по замеренным значениям угловой скорости и угла поворота тела вычисляют определенный интеграл, замеряют работу момента сил электродвигателя через потребляемую электроэнергию, по которым аналитически, с применением двух уравнений изменения энергии с учетом расхода энергии на потери в двигателе, с учетом известного момента инерции тела, определяют осевой коэффициент демпфирования тела. Технический результат заключается в расширении функциональных возможностей при идентификации гидродинамических параметров тела корабельной формы на системах программного управления. 1 ил.

RU 2706909 C1

RU 2706909 C1





FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
G01M 10/00 (2019.08)

(21)(22) Application: **2018142092, 28.11.2018**

(24) Effective date for property rights:
28.11.2018

Registration date:
21.11.2019

Priority:

(22) Date of filing: **28.11.2018**

(45) Date of publication: **21.11.2019** Bull. № 33

Mail address:

**197101, Sankt-Peterburg, Kronverkskij pr., 49,
Universitet ITMO, OIS i NTI**

(72) Inventor(s):

**Alyshev Aleksandr Sergeevich (RU),
Melnikov Vitalij Gennadevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniya "Natsionalnyj issledovatel'skij
universitet ITMO" (Universitet ITMO) (RU)**

(54) **METHOD FOR IDENTIFICATION OF HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF BODY**

(57) Abstract:

FIELD: measuring equipment.

SUBSTANCE: invention relates to hydrodynamics, measurement equipment, laboratory installations, shipbuilding. Method consists in that body in form of ship hull, immersed in liquid at waterline, or with specified draft, with installed on ship hull controlled electric motor with axisymmetric flywheel with vertical axis of rotation and resilient twisted rod semi-programmed non-uniform reverse-symmetric rotary movement relative to the vertical axis, comprising a step of delayed measured rotation at a limited angular interval and a step of measured accelerated rotation in the opposite direction, which is symmetrical to the first

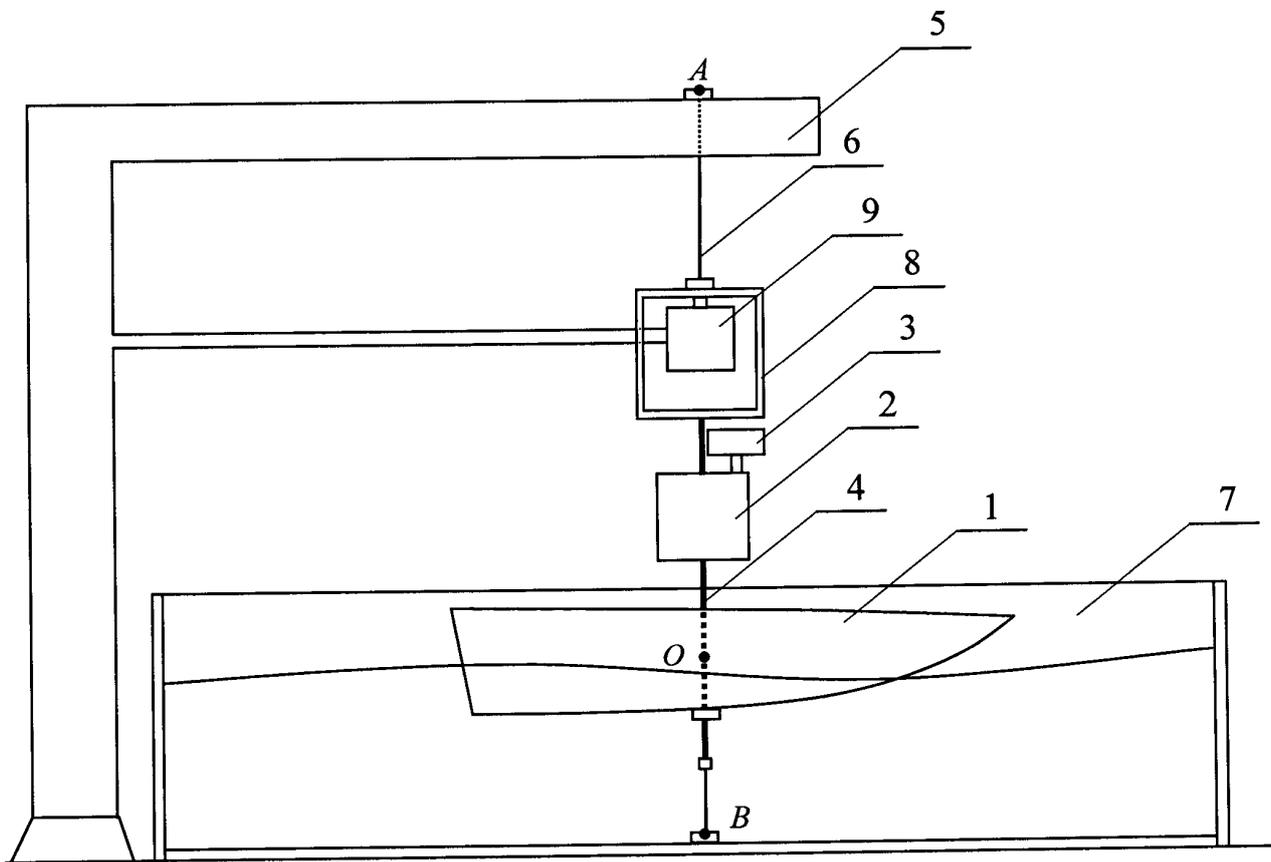
stage. On reverse rotation, along the measured values of angular velocity and body rotation angle, definite integral is calculated, operation of the moment of electric motor forces through consumed power is measured, according to which analytically, using two equations of energy change taking into account of energy consumption for losses in the engine, taking into account the known moment of inertia of the body, the axial body damping coefficient is determined.

EFFECT: broader functional capabilities when identifying hydrodynamic parameters of a ship-shaped body on software control systems.

1 cl, 1 dwg

RU 2706909 C1

RU 2706909 C1



Изобретение относится к гидромеханике, измерительной технике, лабораторным установкам, судостроению, робототехнике и может быть использовано для определения осевого коэффициента демпфирования тела в виде корпуса модели судна, плавучих средств и сооружений при их реверсивно-симметричном вращении вокруг собственной неподвижной вертикальной оси с применением программных движений. Рекомендуется для использования в судостроении на этапах проектирования, а также для уточнения параметров математических моделей судна.

Известен способ для определения тензора инерции тела (патент РФ №2436055, МКП G01M 1/10, дата приоритета 04.05.2009, дата публикации 10.12.2011) заключающийся в том, что тело размещают во внутренней рамке двухосного двухрамочного карданова подвеса, имеющего цилиндрическую форму, горизонтальную подвижную собственную ось вращения, и внешнюю рамку с вертикальной осью прецессии, сообщают ему управляемым электродвигателем и упругим закручиваемым элементом реверсивно-симметричное двухосное сферическое движение, состоящее из непрограммного сферического замедленного вращения по углам прецессии и собственного вращения, синхронных и прямо пропорциональных между собой и обратного ускоренного, симметричного по отношению к замедленному программному движению в обратном направлении по программе, построенной по текущим замерам тормозного движения. На таком реверсивном симметричном сферическом движении, измеряют расходы электроэнергии на десяти интервалах угла собственного поворота. По двадцати значениям расходов энергии с вычетом тепловых омических расходов в обмотках вычисляют пять осевых моментов инерции относительно пяти положений в теле мгновенной оси вращения. Шестой осевой момент инерции определяют отдельно на вращательном движении тела вокруг вертикальной оси прецессии при отключенном собственном вращении с замерами расхода энергии. Недостатком данного способа является то, что он позволяет определять только инерционные параметры тел в виде моментов инерции.

Наиболее близким к изобретению способом является способ идентификации присоединенного момента инерции тела и устройство для его осуществления (патент РФ №2627023, МКП G01M 1/16, дата приоритета 13.10.2016, дата публикации 02.08.2017). Способ заключается в том, что тело в виде корпуса судна погружают в опытовый бассейн по ватерлинию или с заданной осадкой и сообщают одно или несколько реверсивно-симметричных вращений моментом упругих сил вокруг вертикальной оси тела, отсчитываемых от произвольно выбранного углового положения, содержащих этап свободного замедленного замераемого вращения и этап управляемого обратного симметричного вращения с сообщением крутящего момента сил в соответствующих угловых положениях, измеряют работу крутящего момента сил на обратном вращении на ограниченном угловом интервале через потребляемую электроэнергию с учетом обнуления разности работ гидродинамического момента, с учетом расхода энергии на магнитные, электрические и механические потери, с учетом момента инерции тела, с использованием двух рубежных значений модулей вектора угловой скорости определяют присоединенный момент инерции тела. Недостатком данного способа является то, что он направлен на определение только инерционных гидродинамических параметров тел в виде присоединенных моментов инерции тел по углу рыскания.

Решается задача расширения функциональных возможностей при идентификации гидродинамических параметров тела на системах программного управления, способных исполнять программные неравномерные симметричные угловые движения вокруг неподвижной оси тела, проходящей через его центр масс за счет идентификации осевого

коэффициента демпфирования тела по углу рыскания.

Сущность изобретения заключается в том, что телу в виде корпуса судна, погруженному в опытовый бассейн с жидкостью по ватерлинию, или с заданной осадкой, с установленным на вертикальной оси корпуса судна управляемым электродвигателем (со встроенным энкодером) с осесимметричным маховиком, упругим закручиваемым стержнем сообщают полупрограммное неравномерное реверсивно-симметричное вращательное движение вокруг вертикальной оси, отсчитываемое от произвольно выбранного углового положения, содержащее этап произвольного существенно непрограммного замедленного замеряемого вращения на ограниченном угловом интервале и этап ускоренного обратного симметричного первому этапу управляемого вращения в обратном направлении, построенного по замерам угла поворота при тормозном движении. На таком реверсивном симметричном движении замеряют работу крутящего момента сил, создаваемого электродвигателем с маховиком на обратном вращении через потребляемую электроэнергию с учетом расхода энергии на магнитные, электрические и механические потери в двигателе, оцененные по известному коэффициенту полезного действия двигателя, с использованием рубежных значений модулей вектора угловой скорости маховика и тела, с использованием рубежных положений тела определяют осевой коэффициент демпфирования тела.

Идентификация осевого коэффициента демпфирования тела в виде корпуса судна осуществляется следующим образом. Корпус судна, симметричный относительно плоскости xOz , закреплен в опытовом бассейне через продетый через центр масс корпуса судна жесткий стержень, соосно с вертикальной осью вращения корпуса судна. Основным двигателем является упругое устройство. Ось электродвигателя с маховиком расположена на малом расстоянии l от оси Oz . Рассматривается плоское вращательное движение корпуса судна в горизонтальной плоскости Oxy , где $\bar{\omega}_1 = \omega_{1z} \bar{k}$ - векторная угловая скорость корпуса судна, $\omega_{1z} = \pm |\omega|$ - скалярная угловая скорость корпуса судна, $\bar{\Omega} = \Omega_z \bar{k}$ - векторная угловая скорость маховика, $\Omega_z = \pm |\Omega|$ - скалярная угловая скорость маховика, $\bar{\omega} = \bar{\omega}_1 + \bar{\Omega} = (\omega_{1z} + \Omega_z) \bar{k}$ - абсолютная угловая скорость маховика, J_1 и J_2 - моменты инерции корпуса судна и маховика, λ_{66} - присоединенный момент инерции воды при рыскании корпуса судна (вокруг вертикальной оси), m - масса маховика, \bar{v}_O - скорость полюса, взятого на палубе корпуса судна или в плоскости ватерлинии. Моменты инерции жесткого стержня, рамки со статором электродвигателя принимаются малыми и не влияющими на измерение.

Двойные кинетические энергии корпуса $2T_1$, маховика $2T_2$ и жидкости $2T_3$:

$$2T_1 = J_1 \omega_{1z}^2$$

$$2T_2 = mv_O^2 + J_2 (\omega_{1z} + \Omega_z)^2 = (ml^2 + J_2) (\omega_{1z}^2 + \Omega_z^2 + 2\omega_{1z} \Omega_z)$$

$$2T_3 = \lambda_{66} \omega_{1z}^2$$

Двойная кинетическая энергия системы 2Т: корпуса судна, маховика и жидкости:

$$2T = 2(T_1 + T_2 + T_3) = (J_1 + ml^2 + J_2 + \lambda_{66}) \omega_{1z}^2 + (ml^2 + J_2) \Omega_z^2 + 2(ml^2 + J_2) \omega_{1z} \Omega_z \quad (1)$$

К механической системе приложена пара сил, характеризующаяся моментом упругих сил закрученного упругого стержня M_1 мощность которого P_1 ; крутящим моментом электродвигателя M_2 мощность которого P_2 ; приложен гидродинамический

диссипативный момент M_3 которые будем считать приведенными к углу φ с мощностью P_3 . Маломощный электродвигатель выполняет корректирующую функцию со сравнительно малым потреблением электроэнергии и, соответственно, с малыми потерями энергии в электродвигателе, которыми можно пренебречь или учесть приближенно.

Общая мощность системы приложенных моментов пар сил:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = M_1\omega_{1z} + M_2\Omega_z + M_3\omega_{1z}$$

Отсюда находим обобщенные моменты в виде коэффициентов при ω_{1z} и Ω . Вектор-столбец обобщенных моментов:

$$Q = [Q_1 \quad Q_2 \quad Q_3]^T, \text{ при } Q_1=M_1, Q_2=M_2, Q_3=Q_3.$$

Считаем, что корпус судна с упругим стержнем, работающим на кручение, закручивается вокруг вертикальной оси Oz на отрицательный угол $\varphi_0 = -\alpha$ и отпускается без начальной угловой скорости. Наблюдается свободное разгонно-тормозное движение, состоящее из ускоренного движения на интервале времени $[t_0 \quad t_1)$, почти равномерного движения на интервале $[t_1 \quad t_2]$ с мгновенной остановкой при t_2 (при угле φ_2). Замедленное движение, совершаемое за интервал времени $[t_1 \quad t_2]$ на угловом интервале $[\varphi_1 \quad \varphi_2]$ замеряется.

Работа пар сил на угловом интервале $[\varphi_1 \quad \varphi_2]$:

$$A_{12} = \int_{t_1}^{t_2} P dt = \int_{t_1}^{t_2} Q_1\omega_{1z} dt + \int_{t_1}^{t_2} Q_2\Omega_{1z} dt + \int_{t_1}^{t_2} Q_3\omega_{1z} dt = A_\omega + A_\Omega + B,$$

$$\text{где } B = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} Q_3 d\varphi = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M_3 d\varphi,$$

$$A_\Omega = \int_{\psi_1}^{\psi_2} Q_2 d\psi = \int_{\psi_1}^{\psi_2} M_2 d\psi, A_\omega = -\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M_1 d\varphi = -\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} c\varphi d\varphi = -\frac{c}{2}(\varphi_2^2 - \varphi_1^2),$$

c - жесткость упругого стержня.

Датчик угол-код замеряет множество узловых значений угла поворота и угловой скорости корпуса судна, по которым компьютерная программа методом точечной аппроксимации определяет кинематическое уравнение вращения вида $\varphi(t)=f(t)$ на интервале $t \in [t_1 \quad t_2]$, на основании которого составляется функциональное уравнение обратного симметричного движения $\varphi(t')=f(t')$, $t' \in [t_2 - 2t_2 - t_1]$, а также дополнительно определяются значения угловых скоростей судна $\omega_{1z}(t)$. Затем выполняется программное симметричное обратное движение по построенному функциональному уравнению, управляемое электродвигателем с замерами текущего расхода электроэнергии. Встроенный в электродвигатель энкодер определяет узловые значения угловой скорости маховика $\Omega_z(2t_2-t)$.

В целом уравнение симметричного возвратного тормозного-разгонного движения имеет вид:

$$q=q(t) \text{ при } q(t) = \begin{cases} f(t) & \text{при } t \in [t_1 \quad t_2] \\ f(2t_2 - t) & \text{при } t \in [t_2 \quad 2t_2 - t_1] \end{cases}$$

По данным текущего расхода электроэнергии на интервале $t \in [t_1 \quad t_2] \cup [t_2 \quad 2t_2 - t_1]$ на угловом интервале $\varphi = [\beta \quad \varphi_2] \cup [\varphi_2 \quad \beta]$, получим уравнения для прямого и обратного движения:

$$T_{\varphi_2} - T_{\beta} + \Pi_{\varphi_2} - \Pi_{\beta} = A_{\beta\varphi_2} + B_{\beta\varphi_2} \quad (2)$$

$$\tilde{T}_{\beta} - T_{\varphi_2} + \Pi_{\beta} - \Pi_{\varphi_2} = A_{\varphi_2\beta} + B_{\varphi_2\beta} \quad (3)$$

5 где $T_{\varphi_2}=0$ т.к. обратное движение начинается с нулевыми скоростями судна и маховика.

Здесь T_{φ_2} , T_{β} , \tilde{T}_{β} - кинетические энергии системы в краевых угловых положениях, т.е. при $\varphi=\beta$ и $\varphi=\varphi_2$, причем T_{β} определяется для прямого, а \tilde{T}_{β} для обратного движения; Π_{φ_2} и Π_{β} - потенциальные энергии упругого стержня, работающего на кручение вокруг оси Oz в этих положениях, $A_{\beta\varphi_2}$ и $A_{\varphi_2\beta}$ - работы крутящего момента электродвигателя, выполненные на прямом и обратном движениях, $\omega_{1\beta}$ - угловая скорость корпуса судна в положении $\varphi=\beta$, $B_{\beta\varphi_2}$, $B_{\varphi_2\beta}$ - отрицательные работы диссипативных гидродинамических моментов, пропорциональные коэффициенту демпфирования $M_1 = \mu_{66}\dot{\varphi}$.

15 Складывая почленно уравнение (2) и (3) и полагая, что работы диссипативных моментов на двух симметричных движениях совпадают, а также полагая, что прямое движение выполняется при отключенном электродвигателе, получим уравнение:

$$\tilde{T}_{\beta} - T_{\beta} = A_{\varphi_2\beta} + 2B_{\varphi_2\beta} \quad (4)$$

20 Подставляя уравнение (1) в (4) с учетом угловых положений, получим:

$$(ml^2 + J_2)\Omega_{\beta}^2 + 2(ml^2 + J_2)\omega_{1\beta}\Omega_{\beta} = 2(A_{\varphi_2\beta} + 2B_{\varphi_2\beta}) \quad (5)$$

здесь Ω_{β} - угловая скорость маховика в положении $\varphi=\beta$.

Обозначим E_{φ_2} - электроэнергия, потребляемая электродвигателем на обратном 25 движении на угловом интервале $[\varphi_2 \quad \beta]$. Эта энергия расходуется на изменение механической энергии системы и на диссипацию энергии через конструктивное трение, электромагнитные и электрические потери. Механическую работу A электродвигателя можно определить как разность потребляемой электродвигателем энергии и омическим расходом ε , которая определяется формулой:

$$A_{\varphi_2\beta} = E_{\varphi_2} - \varepsilon \quad \text{при} \quad \varepsilon \geq 0. \quad (6)$$

В случае если потери в системе малы, и, если движение осуществляется в основном за счет начальной кинетической энергии и энергии упругого стержня, а двигатель обеспечивает лишь корректирующую роль - поддерживает симметричность реверсивного 35 движения, то с достаточной точностью можно полагать $\varepsilon=0$. В общем случае величина ε может быть аналитически оценена или замерена на испытаниях типовых образцов.

Также механическую работу можно определить при известном коэффициенте полезного действия η электродвигателя:

$$A_{\varphi_2\beta} = \eta E_{\varphi_2} \quad (7)$$

40 Применяя формулу (6) либо (7), а полагая коэффициент μ_{66} демпфирования тела постоянным, и следовательно $B_{\beta\varphi_2} = -\mu_{66} \int_{\beta}^{\varphi_2} \omega_{1z} d\varphi$ из (5) получаем расчетную формулу 45 для коэффициента демпфирования тела относительно вертикальной оси вращения корпуса судна:

$$\mu_{66} = \{(ml^2 + J_2)\Omega_{\beta}^2 + 2(ml^2 + J_2)\omega_{1\beta}\Omega_{\beta} - 2\eta E_{\varphi_2}\} / (4 \int_{\beta}^{\varphi_2} \omega_{1z} d\varphi). \quad (8)$$

Таким образом, заявляемый способ имеет высокую производительность, в связи с тем, что позволяет определить осевой коэффициент демпфирования тела одновременно с моментом инерции, не требует выполнения дополнительных испытаний, что является расширением функциональных возможностей.

5 Сущность предполагаемого изобретения поясняют Фиг.

На Фиг. изображено устройство для осуществления способа, где

- тело в виде корпуса судна 1,
- электродвигатель 2,
- массивный маховик 3,
- 10 - жесткий стержень 4,
- опора 5,
- упругий стержень 6,
- опытовый бассейн 7,
- рамка 8,
- 15 - датчик угол-код 9.

Тело в виде корпуса судна 1 помещают в опытовый бассейн 7. При этом корпус судна 1 с центром масс О, через который корпус судна 1 закреплен с жестким стержнем 4 и с электродвигателем 2 со встроенным энкодером, массивный маховик 3 закреплен на валу электродвигателя 2, жесткий стержень 4 сцеплен с упругим стержнем 6, 20 закрепленным на опоре 5 одним концом в точке А, а другим в точке В, рамка 8 сцеплена с жестким стержнем 4 и упругим стержнем 6 и соединена с датчиком угол-код 9, прикрепленным к опоре 5.

Такое устройство обеспечивает выполнение реверсивно-симметричных вращений тела вокруг вертикальной оси на выбранном угловом интервале, с одновременными 25 замерами его угловой скорости, углового положения и угловой скорости маховика, необходимыми для осуществления способа.

В изобретении применяется энергоемкий упругий стержень 6 с возможностью предварительной начальной зарядкой его упругой потенциальной энергией, и электродвигатель 2 с функцией корректировки реверсивно-симметричного вращения 30 с малым расходом энергии. Упругий стержень 6 и электродвигатель 2 составляют гибридный двигатель, маховик 3 соединен с ротором электродвигателя 2 через редуктор, вал датчика угол-код 9 соосно сцеплен с рамкой 8. Рамка 8 способна вращаться на неполный угол, ограниченный закреплением с опорой 5 датчика угол-код 9.

Устройство работает следующим образом. Упругий стержень 6, закрепленный на 35 опоре 5 и на дне бассейна 7, закрученный вокруг вертикальной оси на начальный угол задает непрограммное неравномерное вращение вокруг неподвижной точки О жесткому стержню 4 с закрепленным на нем корпусом судна 1 через его центр масс, рамке 8 и электродвигателю 2 со встроенным энкодером и маховиком 3. Симметричность программного движения обеспечена гибридным двигателем, состоящим из 40 электродвигателя 2 с маховиком 3, корректирующим движение и упругого стержня 6, работающего на кручение. Текущее измерение угла поворота и угловой скорости корпуса судна 1 осуществляет датчик угол - код 9, закрепленный с опорой 5, аналитическую обработку результатов выполняет компьютер. При этом встроенным энкодером на обратном движении производится непосредственное измерение угловой 45 скорости вращения маховика 3. Управление двигателем осуществляется автоматической системой программного управления. В результате устройство обеспечивает корпусу судна 1 требуемое программное движение.

Таким образом, предлагаемое изобретение позволяет решить задачу расширения

функциональных возможностей в судостроении. Это достигается посредством применения модифицированной расчетной формулы.

(57) Формула изобретения

5 Способ идентификации гидродинамических параметров тела, заключающийся в том, что тело в виде корпуса судна с известной массой и моментом инерции погружают в
 10 опытовый бассейн по ватерлинию или с заданной осадкой и сообщают моментом упругих сил и моментом управляемого электродвигателя с маховиком, с известным коэффициентом полезного действия и известным расстоянием между вертикальными
 15 осями вращения электродвигателя и тела, одно или несколько реверсивно-симметричных вращений вокруг вертикальной оси, отсчитываемых от произвольно выбранного углового положения, содержащих этап свободного замедленного вращения и этап
 управляемого ускоренного обратного симметричного вращения, измеряют угловые скорости и углы поворота тела, измеряют угловую скорость маховика, измеряют
 20 разности работ активных моментов сил через разности потребляемой электроэнергии с учетом расхода энергии на магнитные, электрические и механические потери, отличающийся тем, что по замеренным значениям угловой скорости и угла поворота
 тела вычисляют определенный интеграл и идентифицируют осевой коэффициент демпфирования μ_{66} тела из соотношения

$$20 \quad \mu_{66} = \{(ml^2 + J_2)\Omega_{\beta}^2 + 2(ml^2 + J_2)\omega_{1\beta}\Omega_{\beta} - 2\eta E_{\varphi_2, \beta}\} / (4 \int_{\beta}^{\varphi_2} \omega_{1z} d\varphi)$$

где $\omega_{1z, \varphi}$ - угловая скорость и угол поворота тела, измеряемые на угловом
 интервале $[\varphi_2 \beta]$; $\omega_{1\beta}, \Omega_{\beta}$ - значения угловой скорости тела и угловой скорости маховика
 25 в угловом положении $\varphi = \beta$; m, J_2 - масса тела и момент инерции тела; l - малое расстояние между вертикальными осями вращения электродвигателя и тела; $E_{\varphi_2 \beta}$ - электроэнергия, потребляемая электродвигателем на обратном движении на угловом интервале $[\varphi_2 \beta]$;
 η - коэффициент полезного действия электродвигателя.

30

35

40

45

