

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОДВОДНОГО АППАРАТА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОДВОДНОГО АППАРАТА

С.О. Гостилович

mmm333zzz@yandex.ru

SPIN-код: 8566-6499

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Составлена математическая модель движения подводного аппарата в вертикальной плоскости, построена структурная схема этой модели. К описанию движения тела в жидкости применены упрощенные и обобщенные подходы. Получены линейные модели и передаточные функции контуров движения подводного аппарата. Обоснована возможность раздельного синтеза контуров управления дифференциалом и линейными скоростями. Описано влияние остаточной плавучести на движение подводного аппарата. Показан наихудший случай устойчивости для контуров скорости (линейной и угловой) и показана необходимость разработки контура управления углом дифферента для различных точек линеаризации. В исследованиях использован частотный метод анализа контуров движения.

Ключевые слова

Подводный аппарат, математическая модель, дифференциал, движение в вертикальной плоскости, линеаризованная модель, передаточная функция, остаточная плавучесть, наихудший случай устойчивости

Поступила в редакцию 14.12.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. В статье рассмотрен подводный аппарат (ПА) с удобообтекаемой формой корпуса, не имеющий крылообразных поверхностей с рулевыми механизмами. Движительно-рулевой комплекс ПА состоит из четырех основных винтомоторных агрегатов, расположенных в кормовой части, и подруливающих устройств. Примером такого аппарата служит автономный подводный аппарат «Кла́весин» (рис. 1).

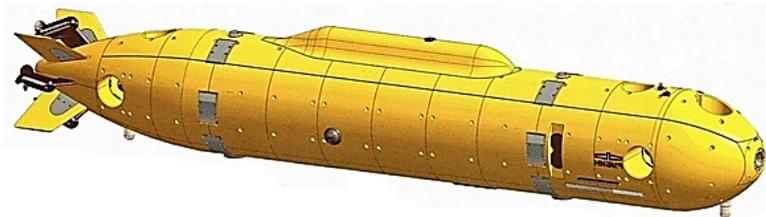


Рис. 1. Внешний вид автономного подводного аппарата «Кла́весин»

Аппараты данного типа широко используются в военных и гражданских целях для решения поисковых, исследовательских, картографических и других задач, поэтому их математическое описание является актуальной задачей.

Целью проводимых исследований является построение и исследование математической модели рассмотренного выше подводного аппарата, описывающей движение ПА в вертикальной плоскости и необходимой для последующего использования результатов данной работы при синтезе системы управления движением ПА.

Математическая модель подводного аппарата. Точное описание гидродинамических воздействий на ПА является сложной для решения задачей даже при наличии современной вычислительной техники, поэтому для описания динамики подводного аппарата применяют упрощенные методы.

Для удобообтекаемых тел разработаны аналитические методы математического описания движения в жидкости [1–8]. Для описания движения в этих методах используется скоростная система координат. Отсутствие в рассматриваемых аппаратах крылообразных рулевых механизмов, силовое воздействие которых напрямую зависит от скорости движения ПА, позволяет воспользоваться общими методами математического описания динамики ПА, которые широко применяются при проектировании систем управления ПА, имеющих неудобообтекаемую форму.

Рассмотрим динамику ПА в вертикальной плоскости при условии малости угла крена и без учета угла курса. Расчетную схему ПА представим упрощенно, проецируя силы, в том числе и гидродинамические, на оси связанной с ПА системы координат, как показано на рис. 2.

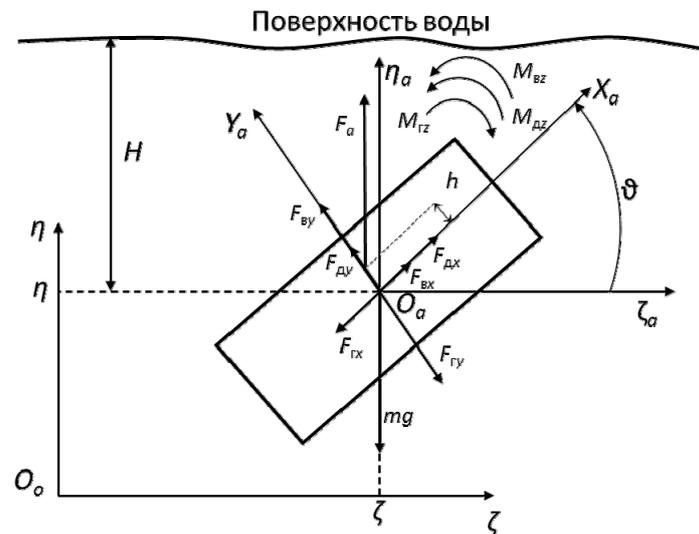


Рис. 2. Расчетная схема ПА:

$O_a X_a Y_a Z_a$ — система координат, связанная с ПА; O_a — центр масс ПА; $O_a \zeta_a \eta_a$ — полусвязанная система координат; $O_o \zeta \eta$ — местная географическая система координат, жестко связанная с неподвижным репером; $F_{Bx}, F_{Bz}, F_{By}, F_{Bz}$ — возмущающие силы и силы гидродинамического сопротивления по осям $O_a X_a$ и $O_a Y_a$ соответственно; F_{Dx}, F_{Dy} — силы, создаваемые движителями по осям $O_a X_a$ и $O_a Y_a$ соответственно; F_A — сила Архимеда; M_{Bz}, M_{Dz}, M_{Tz} — возмущающий момент, момент, создаваемый движителями, и гидродинамический момент вокруг оси $O_a Z_a$ соответственно; H — глубина погружения ПА; h — метацентрическая высота ПА; θ — угол дифферента

Гидродинамические силы выразим в следующем виде:

$$\begin{cases} F_{rx} = -C_{x1} V_x |V_x| - C_{x2} V_x; \\ F_{ry} = -C_{y1} V_y |V_y| - C_{y2} V_y; \\ M_{rz} = -C_{\omega z1} \omega_z |\omega_z| - C_{\omega z2} \omega_z, \end{cases} \quad (1)$$

где C_{x1} , C_{x2} , C_{y1} , C_{y2} , $C_{\omega z1}$, $C_{\omega z2}$ — гидродинамические коэффициенты, вычисленные для данного ПА и данной плотности воды; V_x , V_y — линейные скорости ПА по осям $O_a X_a$, $O_a Y_a$ соответственно; ω_z — угловая скорость ПА вокруг оси $O_a Z_a$.

Коэффициенты C_{x1} , C_{y1} можно найти по следующим формулам:

$$\begin{cases} C_{x1} = C_x S_x \frac{\rho}{2}; \\ C_{y1} = C_y S_y \frac{\rho}{2}, \end{cases}$$

где C_x , C_y — безразмерные гидродинамические коэффициенты для осей $O_a X_a$ и $O_a Y_a$ соответственно; S_x , S_y — характерные площади, соответствующие C_x , C_y ; ρ — плотность воды.

Коэффициент $C_{\omega z1}$ можно найти с помощью методики, описанной в работе [8], представляя, что центр масс ПА неподвижен.

Коэффициенты C_{x2} , C_{y2} , $C_{\omega z2}$ можно вычислить по эмпирической формуле

$$C_{i2} = 0,1C_{i1},$$

где буквой i обозначены индексы x , y , ωz соответственно.

Согласно рис. 2 и с учетом соотношений (1) составим систему уравнений, описывающую движение ПА в вертикальной плоскости:

$$\begin{cases} (\lambda_{11} + m)\dot{V}_x = F_{bx} + F_{dx} + (-C_{x1} V_x |V_x| - C_{x2} V_x) + (F_A - mg) \sin \vartheta; \\ (\lambda_{22} + m)\dot{V}_y = F_{by} + F_{dy} + (-C_{y1} V_y |V_y| - C_{y2} V_y) + (F_A - mg) \cos \vartheta; \\ (\lambda_{66} + J_z)\dot{\omega}_z = M_{bz} + M_{dz} + (-C_{\omega z1} \omega_z |\omega_z| - C_{\omega z2} \omega_z) - F_A h \sin \vartheta; \\ \omega_z = \dot{\vartheta}; \\ \dot{\zeta} = V_x \cos \vartheta - V_y \sin \vartheta; \\ \dot{\eta} = V_x \sin \vartheta + V_y \cos \vartheta; \\ \zeta = \int \dot{\zeta} dt; \\ \eta = \int \dot{\eta} dt, \end{cases} \quad (2)$$

где m , J_z , g — масса ПА, момент инерции вокруг оси $O_a Z_a$ и ускорение свободного падения соответственно; λ_{11} , λ_{22} , λ_{66} — присоединенные массы по осям $O_a X_a$,

$O_a Y_a$ и присоединенный момент инерции вокруг оси $O_a Z_a$ соответственно; ζ, η — линейные скорости ПА по осям $O_a \zeta$ и $O_a \eta$ соответственно; $\dot{V}_x, \dot{V}_y, \dot{\omega}_z, \dot{\vartheta}$ — производные по времени величин $V_x, V_y, \omega_z, \vartheta$ соответственно.

По данной системе составим общую структурную схему модели ПА (рис. 3).

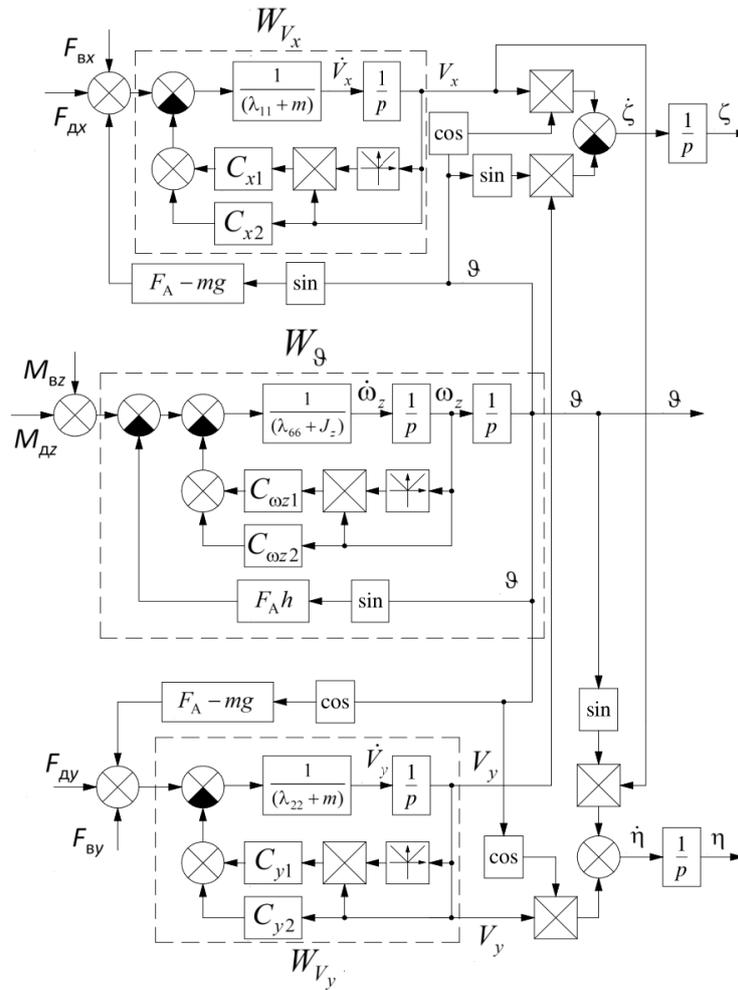


Рис. 3. Структурная схема модели ПА

Анализ модели подводного аппарата. Анализируя структурную схему модели подводного аппарата (см. рис. 3), можно сделать следующие выводы:

- в структурной схеме модели выделяются отдельные обособленные контуры, которые можно представить как функции $W_{V_x}, W_{V_y}, W_{\vartheta}$, следовательно, системы управления для них можно разрабатывать независимо друг от друга;
- связь между дифференциалом и скоростями V_x, V_y появляется благодаря ненулевой остаточной плавучести ($F_a - mg \neq 0$), которая представляет собой силовое воздействие;

– при отсутствии остаточной плавучести скорости V_x , V_y не будут зависеть от угла дифферента, следовательно, их значения можно представить как постоянные, зависящие только от системы управления соответствующими каналами движения;

– в модель ПА входят нелинейные элементы, которые затрудняют синтез системы управления, поэтому их целесообразно линеаризовать.

В дальнейшем рассмотрим только контур дифферента W_ϑ , в состав которого входит контур угловой скорости W_ω , полностью аналогичный контурам линейных скоростей W_{V_x} , W_{V_y} .

Исследование контура дифферента. *Линеаризация контура дифферента.* Проведем линеаризацию нелинейных элементов модели ПА методом разложения в ряд Тейлора и отбрасывания элементов второго и более порядка малости [9]:

$$M_{rz} \approx -\left(C_{\omega z1} \omega_z^* \left| \omega_z^* \right| + C_{\omega z2} \omega_z^*\right) - \left(2C_{\omega z1} \omega_z^* + C_{\omega z2}\right) \Delta \omega_z;$$

$$\sin \vartheta \approx \sin \vartheta^* + \cos \vartheta^* \cdot \Delta \vartheta,$$

где ω_z^* , ϑ^* — точки линеаризации момента M_{rz} и $\sin \vartheta$ соответственно; $\Delta \omega_z$, $\Delta \vartheta$ — отклонения угловой скорости и угла дифферента от значений ω_z^* и ϑ^* соответственно.

Перейдем к системе в отклонениях, описывающей движение ПА по дифференту (рис. 4).

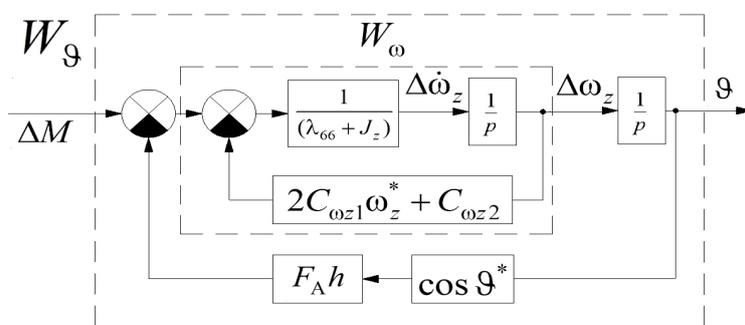


Рис. 4. Линеаризованная структурная схема контура дифферента

Линеаризация позволяет перейти от нелинейной системы к линейной системе с переменными коэффициентами.

Отметим, что для дальнейшего синтеза системы управления полезно определить наихудший случай с точки зрения устойчивости. Устойчивая система, синтезированная для наихудшего случая устойчивости, гарантированно будет устойчива для других точек линеаризации.

Анализ контура угловой скорости. В контуре дифферента выделяется передаточная функция по угловой скорости:

$$W_{\omega} = \frac{\Delta\omega_z(p)}{\Delta M(p)} = \frac{\frac{1}{(\lambda_{66} + J_z)p}}{1 + \frac{1}{(\lambda_{66} + J_z)p} (2C_{\omega z1}\omega_z^* + C_{\omega z2})} = \frac{\frac{1}{2C_{\omega z1}\omega_z^* + C_{\omega z2}}}{\frac{(\lambda_{66} + J_z)p}{2C_{\omega z1}\omega_z^* + C_{\omega z2}} + 1}.$$

Передаточная функция W_{ω} представляет собой апериодическое звено

$$W_{\omega} = \frac{K_{\omega}}{T_{\omega}p + 1},$$

где

$$K_{\omega} = \frac{1}{2C_{\omega z1}\omega_z^* + C_{\omega z2}}; \quad (3)$$

$$T_{\omega} = \frac{\lambda_{66} + J_z}{2C_{\omega z1}\omega_z^* + C_{\omega z2}}. \quad (4)$$

Для исследования свойств контура угловой скорости рассмотрим логарифмические амплитудную и фазовую частотные характеристики (ЛАЧХ и ЛФЧХ соответственно) передаточной функции W_{ω} для различных значений ω_z^* (рис. 5).

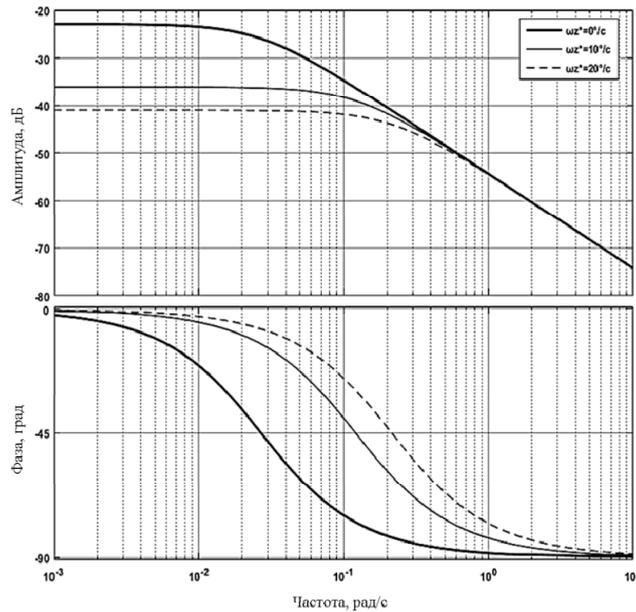


Рис. 5. ЛАЧХ и ЛФЧХ передаточной функции W_{ω} для различных значений ω_z^*

Анализируя приведенные на рис. 5 графики, можно сделать следующие заключения:

- на высоких частотах графики почти совпадают;
- при увеличении ω_z^* ЛФЧХ сдвигаются вверх, а ЛАЧХ — вниз;

Таким образом, ЛАЧХ для случая $\omega_z^* > 0$ всегда ниже, чем для $\omega_z^* = 0$, однако ЛФЧХ для $\omega_z^* > 0$ всегда выше, чем ЛФЧХ для $\omega_z^* = 0$. Это означает, что при $\omega_z^* > 0$ система будет заведомо более устойчивой, чем при $\omega_z^* = 0$, следовательно, можно выделить наихудший с точки зрения устойчивости случай, соответствующий $\omega_z^* = 0$.

Отметим, что контуры W_{V_x} , W_{V_y} будут иметь полностью аналогичные свойства, для них наихудший с точки зрения устойчивости случай также будет наблюдаться при нулевой скорости.

Анализ контура углового положения ПА. Выделим передаточную функцию по углу дифферента:

$$W_{\vartheta} = \frac{\Delta\vartheta(p)}{\Delta M(p)} = \frac{\frac{K_{\omega}}{(T_{\omega}p+1)p}}{1 + \frac{K_{\omega}}{(T_{\omega}p+1)p}(F_a h \cos \vartheta^*)} = \frac{K_{\omega}}{T_{\omega}p^2 + p + K_{\omega}F_a h \cos \vartheta^*}.$$

Учитывая выражения (3) и (4), получим

$$W_{\vartheta} = \frac{1}{\frac{T_{\omega}}{K_{\omega}F_a h \cos \vartheta^*}p^2 + \frac{1}{K_{\omega}F_a h \cos \vartheta^*}p + 1}.$$

Тогда передаточная функция по угловому положению W_{ϑ} будет представлять собой колебательное звено

$$W_{\vartheta} = \frac{K_{\vartheta}}{T_{\vartheta}^2 p^2 + 2\zeta_{\vartheta}T_{\vartheta}p + 1},$$

где

$$K_J = \frac{1}{F_a h \cos \vartheta^*}; \quad T_{\vartheta} = \sqrt{\frac{\lambda_{66} + J_z}{F_a h \cos \vartheta^*}}; \quad \zeta_{\vartheta} = \frac{2C_{\omega z1}\omega_z^* + C_{\omega z2}}{2\sqrt{(\lambda_{66} + J_z)F_a h \cos \vartheta^*}}.$$

Для исследования свойств контура углового положения рассмотрим ЛАЧХ и ЛФЧХ функции W_{ϑ} для различных значений ϑ^* (рис. 6).

Анализируя характеристики передаточной функции W_{ϑ} (см. рис. 6), можно сделать следующие выводы:

– на высоких частотах ЛАЧХ и ЛФЧХ для различных значений ϑ^* почти совпадают;

– на частотах совпадения графиков при увеличении ϑ^* ЛАЧХ и ЛФЧХ сдвигаются вниз, следовательно, нельзя установить самый худший случай с точки зрения устойчивости, как было сделано при анализе передаточной функции W_{ω} .

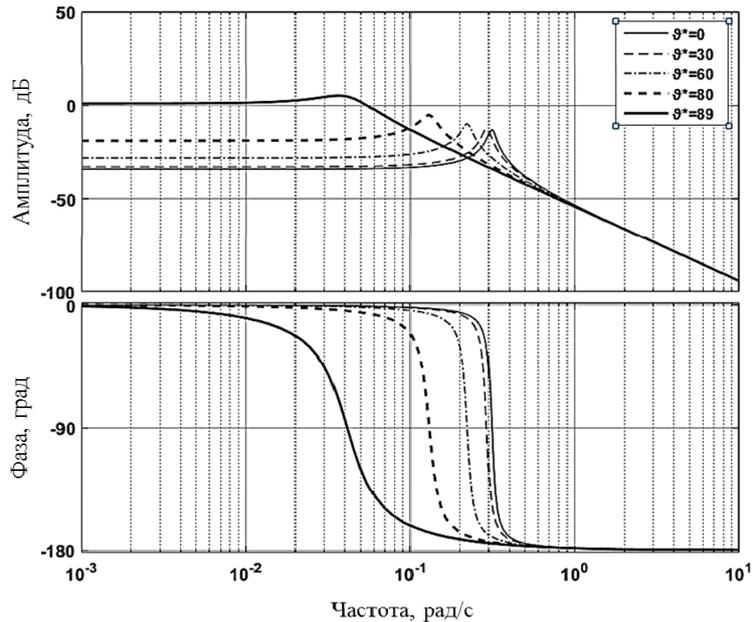


Рис. 6. ЛАЧХ и ЛФЧХ передаточной функции по ϑ

Заключение. В ходе выполненных исследований была описана математическая модель движения ПА в вертикальной плоскости. Модель сформирована на основе упрощенных подходов, применяемых для ПА, имеющих неудобообтекаемую форму.

Анализ модели ПА позволил сформулировать следующие важные для синтеза системы управления выводы:

- в модели «обособляется» контур углового положения по дифференту, а это означает, что в системе управления движением ПА в вертикальной плоскости можно выделить задачи управления дифферентом и линейными скоростями вдоль осей связанной с ПА системы координат;
- связь угла дифферента и линейных скоростей ПА возникает благодаря ненулевой остаточной плавучести, которую можно представить как внешнюю возмущающую силу.

Результаты исследования линеаризованной модели контуров движения ПА позволяют сделать следующие выводы:

- в контурах скорости (линейной или угловой) наилучший с точки зрения устойчивости случай возникает при нулевой скорости;
- в контуре угла дифферента не удастся в общем случае выделить наилучший с точки зрения устойчивости случай, поэтому синтез системы управления необходимо проводить для разных точек линеаризации по дифференту.

Целями дальнейших исследований является построение и изучение контура управления углом дифферента, а впоследствии — построение и изучение системы управления глубиной погружения ПА на основе синтезированного ранее контура дифферента.

Литература

- [1] Грумондз В.Т., Половинкин В.В., Яковлев Г.А. *Теория движения двусредных аппаратов. Математические модели и методы исследования*. Москва, Вузовская книга, 2012, 644 с.
- [2] Грумондз В.Т., Яковлев Г.А. *Алгоритмы аэрогидродинамического проектирования*. Моисеева Т.В., ред. Москва, Изд-во МАИ, 1994, 304 с.
- [3] Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Медведев А.В. О некоторых задачах динамики и управления пространственным движением АНПА. *Подводные исследования и робототехника*, 2006, № 2, с. 13–26.
- [4] Киселев Л.В., Медведев А.В. Исследование динамических свойств автономного подводного робота на основе типологии процессов и моделей нечеткого управления. *Подводные исследования и робототехника*, 2008, № 1(5), с. 16–23.
- [5] Киселев Л.В., Медведев А.В. Модели динамики и алгоритмы управления движением автономного подводного робота при траекторном обследовании аномальных физических полей. *Подводные исследования и робототехника*, 2011, № 1(11), с. 24–31.
- [6] Киселев Л.В., Медведев А.В. О параметрических соотношениях гидродинамики и устойчивости движения автономного подводного робота. *Подводные исследования и робототехника*, 2012, № 1(13), с. 17–22.
- [7] 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.
- [8] Лукомский Ю.А. Чугунов В.С. *Системы управления морскими подвижными объектами*. Ленинград, Судостроение, 1988, 272 с.
- [9] Соболев Г.В. *Управляемость корабля и автоматизация судовождения*. Ленинград, Судостроение, 1976, 477 с.
- [10] Бесекерский В.А., Попов Е.П. *Теория систем автоматического управления*. Санкт-Петербург, Профессия, 2007, 752 с.

Гостилович Сергей Олегович — студент кафедры «Подводные роботы и аппараты», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Егоров Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подводные роботы и аппараты», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

DESIGNING AND VERTICAL TESTING OF THE SUBMERSIBLE MOTION CONTROL SYSTEM. THE MATHEMATICAL MODEL OF THE SUBMERSIBLE

S.O. Gostilovich

mmm333zzz@yandex.ru

SPIN-code: 8566-6499

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

We have developed a mathematical model of the submersible vertical motion and constructed a structural flowchart of this model. We apply simplified and generalized approaches to describing the motion of body in the liquid medium. The linear models and loop transfer functions of the submersible motion have been obtained. The article justifies the possibility of the separate control loops synthesis by means of the hull angle and linear velocities. It describes the impact of the residual buoyancy on the submersible motion. We show the worst case of steadiness for the linear and angular speed loops, as well as the necessity of designing the trim angle control loop for different linearization points. In this research we use a frequency-response method for the motion contours analysis.

Keywords

Submersible, mathematical model, hull angle, vertical motion, linearization model, transfer function, residual buoyancy, the worst case of steadiness

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Grumondz V.T., Polovinkin V.V., Yakovlev G.A. Teoriya dvizheniya dvusrednykh apparatov. Matematicheskie modeli i metody issledovaniya [Movement theory of two-medium apparatus. Mathematical models and research methods]. Moscow, Vuzovskaya kniga publ., 2012, 644 p.
- [2] Grumondz V.T., Yakovlev G.A. Algoritmy aerogidrodinamicheskogo proektirovaniya [Algorithms of aerohydrodynamic engineering]. Moscow, MAI publ., 1994, 304 p.
- [3] Kiselev L.V., Inzartsev A.V., Medvedev A.V. On some problems of dynamics and spatial motion control of unmanned underwater vehicle. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigations and Robotics], 2006, no. 2, pp. 13–26.
- [4] Kiselev L.V., Medvedev A.V. Research of AUV dynamic features on basis of processes typology and fuzzy control models. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigations and Robotics], 2008, no. 1(5), pp. 16–23.
- [5] Kiselev L.V., Medvedev A.V. Dynamics models and control algorithms of autonomous underwater robot in trajectory inspection of the physical fields anomalies. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigations and Robotics], 2008, no. 1(11), pp. 24–31.
- [6] Kiselev L.V., Medvedev A.V. On parametric relation of hydrodynamics and motion stability of the autonomous underwater robot. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigations and Robotics], 2013, no. 1(15), pp. 17–22.
- [7] Kiselev L.V., Medvedev A.V. Comparative analysis and the optimization of the autonomous underwater robots dynamic properties of different projects and configurations.

Podvodnye issledovaniya i robototekhnika [Underwater Investigations and Robotics], 2012, no. 1(13), pp. 24–35.

- [8] Lukomskiy Yu.A., Chugunov V.S. Sistemy upravleniya morskimi podvizhnymi ob'ektami [Control systems of marine vehicles]. Leningrad, Sudostroenie publ., 1988, 272 p.
- [9] Sobolev G.V. Upravlyaemost' korablya i avtomatizatsiya sudovozhdeniya [Ship controllability and marine navigation automation]. Leningrad, Sudostroenie publ., 1976, 477 p.
- [10] Besekerskiy V.A., Popov E.P. Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya [Automatic control system theory]. Sankt-Peterburg, Professiya publ., 2007, 752 p.

Gostilovich S.O. — student, Department of Submersible Robots and Mechanisms, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Egorov S.A., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Submersible Robots and Mechanisms, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.