

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОДВОДНОГО АППАРАТА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ. СИНТЕЗ КОНТУРА ДИФФЕРЕНТА

С.О. Гостилович¹

mmm333zzz@yandex.ru

SPIN-код: 8566-6499

А.О. Гостилович²

gostaleks@mail.ru

SPIN-код: 8130-0979

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

Аннотация

На основе использования упрощенной математической модели подводного аппарата с помощью частотных методов синтеза построен контур управления углом дифферента. При построении контура управления добавлены обратные связи по положению и скорости. Показана слабая зависимость устойчивости контура углового положения по дифференту от точки линеаризации по углу дифферента. Обосновано использование ПИ-регулятора с пределом интегрирования для устранения статических ошибок от входного воздействия и внешних возмущений. Для определения параметров ПИ-регулятора использовали метод имитационного моделирования. Предложен адаптивный закон формирования предела интегрирования в зависимости от входного воздействия. Про моделирована работа контура управления дифферентом с учетом нелинейности модели подводного аппарата.

Ключевые слова

Подводный аппарат, математическая модель, дифферент, движение в вертикальной плоскости, линеаризованная модель, обратные связи, ПИ-регулятор, адаптивная система, передаточная функция, наихудший случай устойчивости

Поступила в редакцию 28.03.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

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

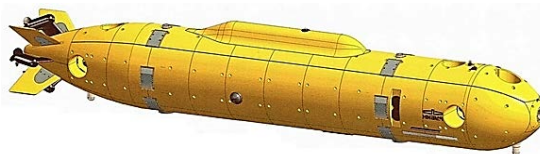


Рис. 1. Внешний вид автономного подводного аппарата «Клавесин»

Аппараты данного типа широко используются в гражданских и военных целях, например, для решения поисковых, исследовательских и картографических задач.

Движение рассматриваемого ПА в вертикальной плоскости осуществляется путем изменения угла дифферента и движения по маршевому направлению. Отсутствие прямой связи между маршевой скоростью ПА и моментом от движителей, поворачивающим аппарат по дифференту, позволяет декомпозировать задачу построения системы управления (СУ) движением подводного аппарата в вертикальной плоскости на следующие элементы:

- контур управления дифферентом ПА;
- контур управления глубиной погружения ПА.

Целью проводимых исследований является построение и исследование контура дифферента рассмотренного выше подводного аппарата, который впоследствии может быть использован для синтеза контура управления глубиной погружения ПА.

Используемая математическая модель ПА. Для математического описания движения удобообтекаемого тела в жидкости существуют аналитические методы [1–7]. Для описания движения в этих методах применяется скоростная система координат. Учитывая, что в аппаратах рассматриваемого типа прямая связь силовых воздействия ДРК от скорости продольного движения ПА отсутствует, в исследовании будем пользоваться общими методами математического описания динамики ПА [8].

Рассмотрим динамику ПА в вертикальной плоскости при условии малости угла крена и без учета угла курса. Основываясь на работе [8], выпишем соотношения, описывающие движения ПА по дифференту:

$$\begin{cases} (\lambda_{66} + J_z) \dot{\omega}_z = M_{Bz} + M_{Dz} + (-C_{\omega z 1} \omega_z |\omega_z| - C_{\omega z 2} \omega_z) - F_A h \sin \vartheta; \\ \omega_z = \dot{\vartheta}, \end{cases} \quad (1)$$

где J_z , λ_{66} — момент инерции и присоединенный момент инерции вокруг оси $O_a Z_a$ (ось связанной с ПА системой координат) соответственно; ω_z — угловая скорость ПА вокруг оси $O_a Z_a$; M_{Bz} , M_{Dz} — возмущающий момент, момент, создаваемый движителями, и гидродинамический момент вокруг оси $O_a Z_a$ (ось связанной с ПА системой координат) соответственно; $C_{\omega z 1}$, $C_{\omega z 2}$ — гидродинамические коэффициенты, вычисленные для данного ПА и данной плотности воды [8, 9]; F_A — сила Архимеда; h — метацентрическая высота ПА; ϑ — угол дифферента.

Для синтеза СУ контуром дифферента линеаризуем выражения (1) и перейдем к системе в отклонениях [9]:

$$\begin{aligned} M_{Dz} &\approx -\left(C_{\omega z 1} \omega_z^* |\omega_z^*| + C_{\omega z 2} \omega_z^*\right) - \left(2C_{\omega z 1} \omega_z^* + C_{\omega z 2}\right) \Delta \omega_z; \\ \sin \vartheta &\approx \sin \vartheta^* + \cos \vartheta^* \cdot \Delta \vartheta, \end{aligned}$$

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

Структурная схема контура дифферента в таком случае имеет вид, показанный на рис. 2.

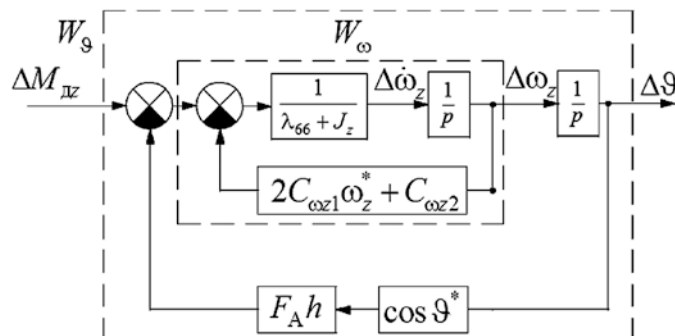


Рис. 2. Линеаризованная структурная схема контура дифферента

Таким образом, в контуре дифферента выделяется передаточная функция (ПФ) по угловой скорости $W_\omega = \frac{K_\omega}{T_\omega p + 1}$, где $K_\omega = \frac{1}{2C_{\omega z1} \omega_z^* + C_{\omega z2}}$, $T_\omega = \frac{\lambda_{66} + J_z}{2C_{\omega z1} \omega_z^* + C_{\omega z2}}$, и передаточная функция по угловому положению $W_\vartheta = \frac{K_\vartheta}{T_\vartheta^2 p^2 + 2\zeta_\vartheta T_\vartheta p + 1}$, где $K_\vartheta = \frac{1}{F_A h \cos \vartheta^*}$, $T_\vartheta = \sqrt{\frac{\lambda_{66} + J_z}{F_A h \cos \vartheta^*}}$, $\zeta_\vartheta = \frac{2C_{\omega z1} \omega_z^* + C_{\omega z2}}{2\sqrt{(\lambda_{66} + J_z) F_A h \cos \vartheta^*}}$.

Синтез контура управления дифферентом. Контур системы управления дифферентом будем строить путем формирования главной обратной связи по угловому положению, коэффициента усиления K_1 и обратной связи по скорости с коэффициентом K_2 . Такая схема СУ проста в реализации и требует измерения только угловой скорости и угла дифферента, что выполняется стандартным набором датчиков ориентации ПА.

При синтезе СУ зададимся следующими требованиями:

- перерегулирование в контурах скорости и положения не более 5 %;
- нулевая статическая ошибка в контуре положения;
- отработка внешних возмущений с нулевой статической ошибкой.

Также примем, что датчики измерения являются идеальными (без погрешностей) и выдают информацию в градусах, следовательно, в структурной схеме СУ датчик будет описываться коэффициентом $\pi/180$.

Синтез коэффициента K_2 . Синтез коэффициента K_2 будем проводить методом стандартных характеристических полиномов без учета момента от силы Архимеда (рис. 3).

Контур скорости в таком случае представляет собой колебательное звено с ПФ

$$W_{k_2} = \frac{K_{k_2}}{T_{k_2}^2 p^2 + 2\zeta_{k_2} T_{k_2} p + 1}.$$

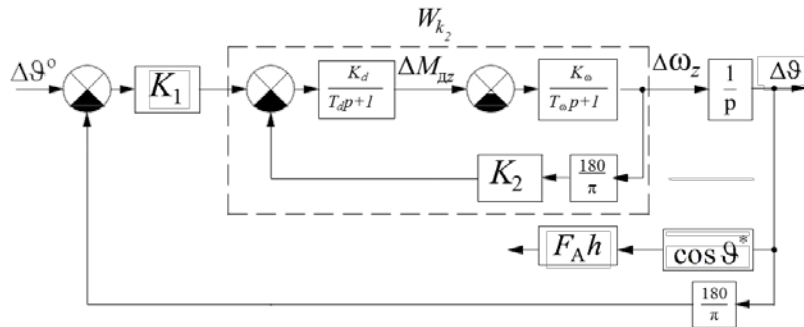


Рис. 3. Структурная схема СУ дифферентом для синтеза K_2

Учитывая, что для колебательного звена при перерегулировании не более 5% наименьшее время переходного процесса обеспечивается при $\zeta_{k_2} = \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,707$, предлагается вычислять коэффициент K_2 по следующей формуле:

$$K_2 = \frac{\pi}{180} \frac{(T_\omega + T_d)^2 - 4T_\omega T_d \zeta_{k_2}^2}{4T_\omega T_d \zeta_{k_2}^2 K_\omega K_d}$$

При моделировании K_2 синтезировали для наихудшего с точки зрения устойчивости случая, который имеет место при $\omega_z^* = 0$ [8].

Синтез коэффициента K_1 . Перед синтезом коэффициента K_1 необходимо свернуть в единую ПФ элементы системы, находящиеся после K_1 (рис. 4).

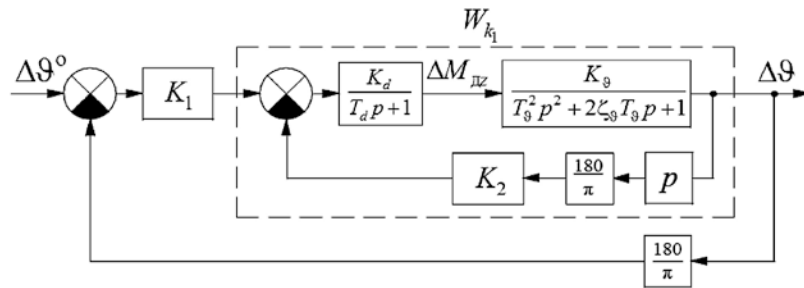


Рис. 4. Структурная схема СУ дифферентом для синтеза K_1

Для изучения вспомогательной ПФ W_{k_1} построим ее логарифмическую частотную характеристику (ЛЧХ) — рис. 5.

Анализируя полученные ЛЧХ (см. рис. 5), можно сделать следующие выводы:

– передаточная функция W_{k_1} раскладывается на колебательное и апериодическое звенья:

$$W_{k_1} = \frac{K_{k_1}}{(T_0^* p + 1) \left((T_1^*)^2 p^2 + 2\zeta_1 T_1^* p + 1 \right)},$$

где T_0^* , T_1^* , ζ_1 , K_{k_1} — параметры, значения которых определяются численными методами;

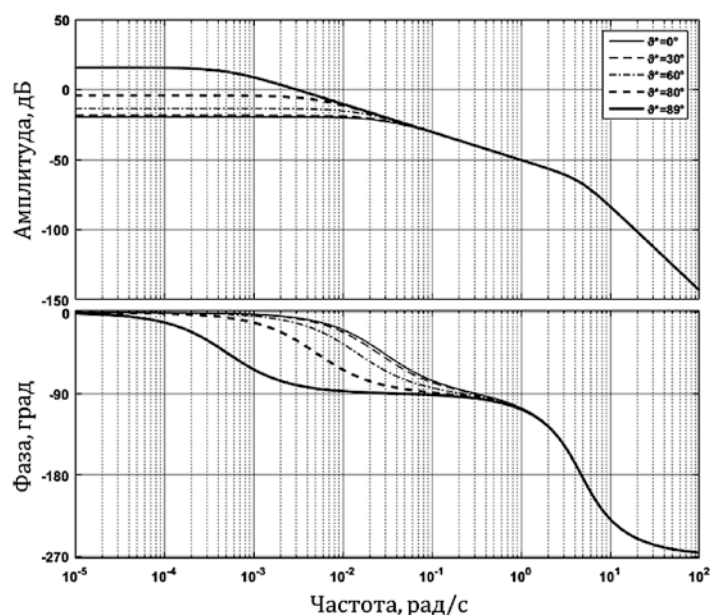


Рис. 5. ЛЧХ ПФ W_{k_1} при различных ϑ^*

- $T_1 \ll T_0$, что объясняет длинную зону минус первого наклона ЛАЧХ;
- на высоких частотах ЛЧХ при различных значениях угла ϑ^* практически совпадают;
- логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) полученной ПФ имеет вид 0–1–3.

Синтез коэффициента K_1 будем проводить по методике, описанной в работе [10] и основанной на показателе колебательности M для ЛАЧХ вида 0–1–2–3:

$$K_1 \leq \frac{\pi}{180} \frac{T_0 (M^2 + M\sqrt{M^2 - 1})}{4K_{k_1} T_1}$$

Показатель колебательности M выберем равным 1,02, чтобы обеспечить перерегулирование менее 5 %.

Максимальные значения K_1 для различных точек линеаризации по углу дифферента ϑ^* приведены ниже

ϑ^* , град	0	30	60	80	89
K_1 , В/град	8,46	8,47	8,49	8,51	8,52

Как видно из таблицы, значение коэффициента K_1 слабо зависит от ϑ^* .

Отметим, что минимальное значение K_1 наблюдается для $\vartheta^* = 0$, следовательно, $\vartheta^* = 0$ является наилучшим с точки зрения устойчивости случаем.

Введение в контур дифферента ПИ-регулятора. После синтеза коэффициентов K_1 и K_2 передаточная функция разомкнутой системы управления дифферентом имеет следующий вид:

$$W_{\text{раз}} = \frac{K_1 K_{k_1}}{(T_0^* p + 1) ((T_1^*)^2 p^2 + 2\zeta_1 T_1^* p + 1)}$$

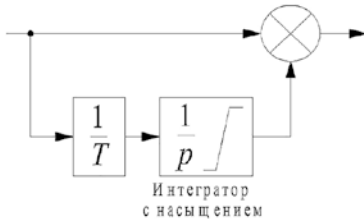


Рис. 6. Структурная схема ПИ-регулятора

Данная ПФ не имеет астатизма, следовательно, в замкнутой системе будет возникать статическая ошибка. Эта ошибка будет возникать также при воздействии внешних возмущений. Для устранения статических ошибок предлагается использовать ПИ-регулятор.

ПИ-регулятор примем в виде, представленном на рис. 6 и имеющем следующую передаточную функцию:

$$W_{\text{ПИ}} = \frac{1}{T} \frac{(Tp + 1)}{p}$$

где T — параметр ПИ-регулятора.

В контуре дифферента будем использовать ПИ-регулятор, в состав которого входит интегратор с насыщением с предельным значением интегрирования $U_{\text{инт}}^{\text{max}}$, поэтому встроим ПИ-регулятор в контур СУ сразу после коэффициента K_1 , что позволит задавать предельное значение интегрирования независимо от коэффициента K_1 .

Параметр ПИ-регулятора T выберем методом имитационного моделирования, построив переходные процессы для различных T и ϑ^* (рис. 7).

Отметим, что при $\vartheta^* = 89^\circ$ в системе возникает большее перерегулирование, чем при $\vartheta^* = 0^\circ$ для одинакового значения параметра T , следовательно, наихудший с точки зрения устойчивости случай при введении ПИ регулятора имеет место при $\vartheta^* = 89^\circ$.

Анализируя рис. 8, можно найти значение сигнала с выхода ПИ регулятора, необходимое для компенсации момента от силы Архимеда и внешнего возмущения:

$$U_{\text{ПИ}} = \frac{F_A h \sin \vartheta - M_{\text{вз.}}}{K_d} \tag{2}$$

Учитывая, что при малом угле дифферента требуется меньшее значение предела интегрирования $U_{\text{инт}}^{\text{max}}$, целесообразно использовать переменное значение предела интегрирования, тем самым добавляя к СУ свойства адаптивности.

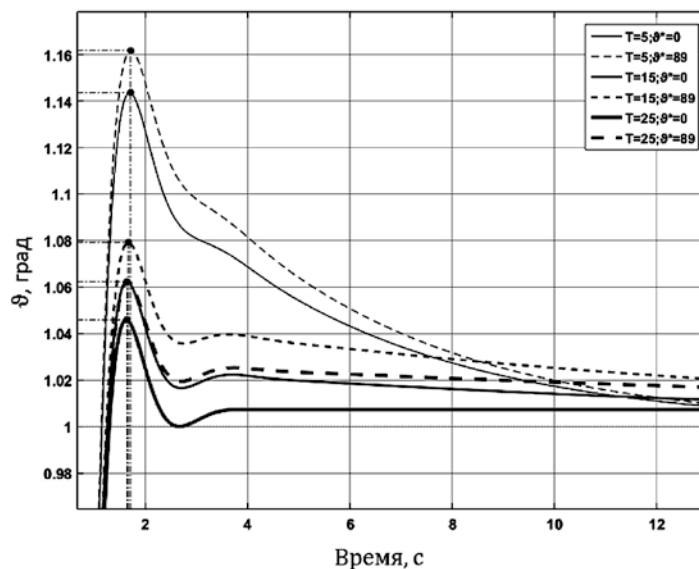


Рис. 7. Переходные процессы в линеаризованном контуре дифферента

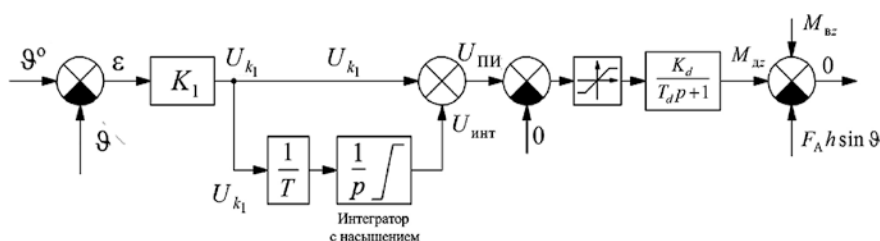


Рис. 8. Структурная схема части контура дифферента для установившегося состояния

На основе (2) предел интегрирования $U_{\text{инт}}^{\text{max}}$ будем определять по следующему закону:

$$U_{\text{инт}}^{\text{max}} = \frac{F_A h \sin \vartheta^0}{K_d} + \frac{M_{\text{воз}}^*}{K_d},$$

где F_A, h — сила Архимеда и метацентрическая высота ПА соответственно; ϑ^0 — входное воздействие на контур системы управления углом дифферента; $M_{\text{воз}}^*$ — предполагаемое внешнее возмущающее воздействие; K_d — коэффициент усиления передаточной функции двигателей.

Исследование контура дифферента с учетом нелинейностей. Структурная схема нелинейной модели синтезированного контура дифферента представлена на рис. 9.

По данной структурной схеме были построены переходные процессы при подаче $\vartheta^0 = 5^\circ$ (рис. 10), $\vartheta^0 = 60^\circ$ (рис. 11) и различных внешних возмущениях $M_{\text{вз}}$ (рис. 12).

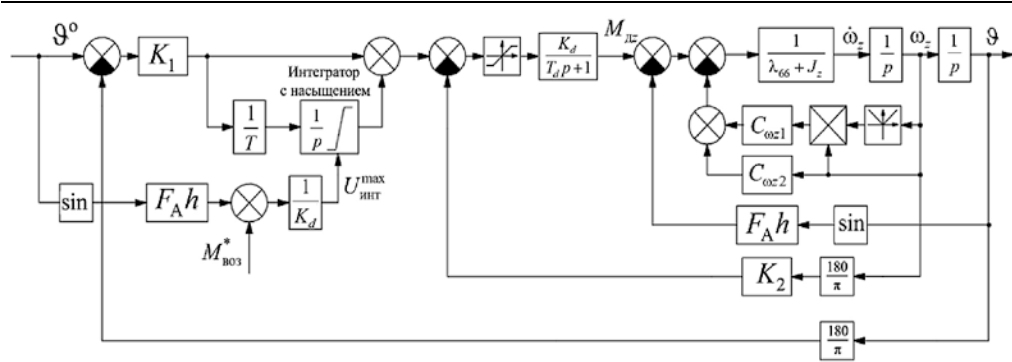


Рис. 9. Структурная схема нелинейной модели контура дифферента

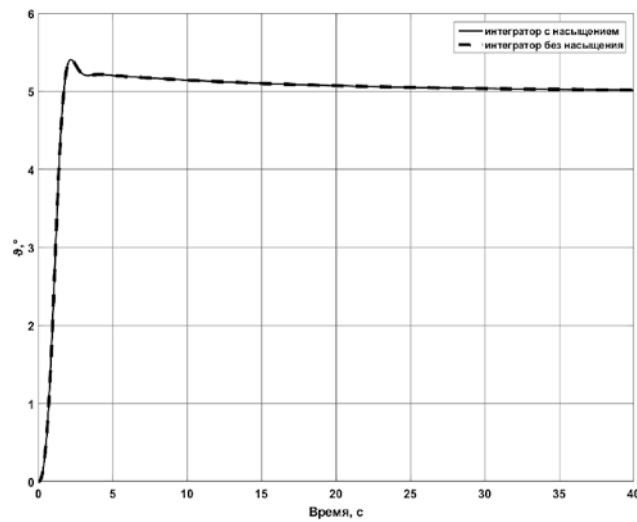


Рис. 10. Переходные процессы в контуре дифферента при $\vartheta^0 = 5^\circ$

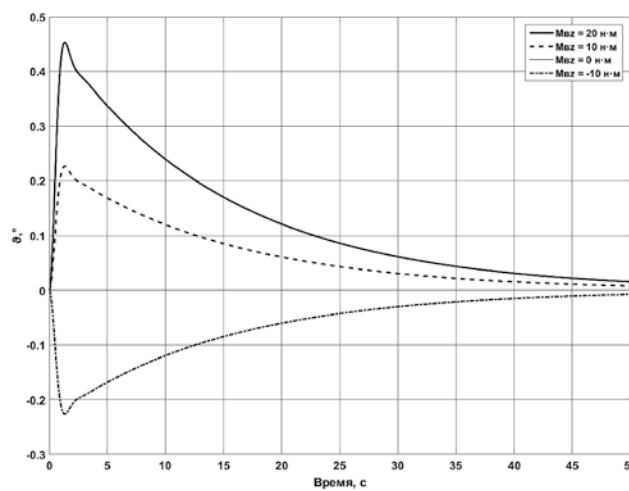


Рис. 11. Переходные процессы в контуре дифферента при $\vartheta^0 = 60^\circ$

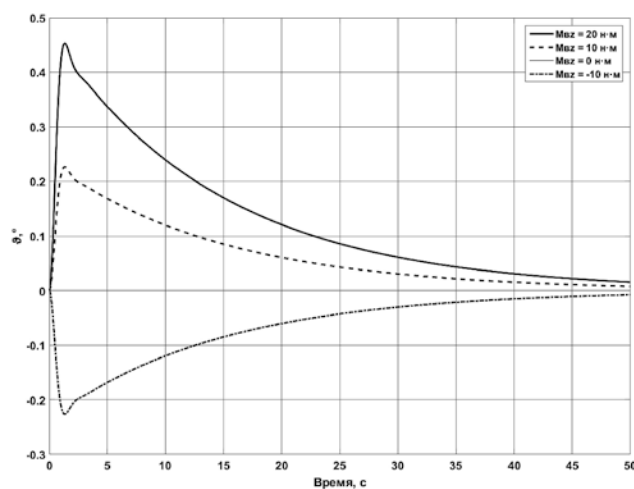


Рис. 12. Переходные процессы в контуре дифферента при различных внешних возмущениях M_{BZ}

Анализируя данные графики (см. рис. 10), можно сделать следующие выводы:

- система обрабатывает входные воздействия без статической ошибки;
- при больших задающих воздействиях введение в систему интегратора с насыщением существенно уменьшает перерегулирование и время переходного процесса;
- при больших задающих воздействиях наблюдается увеличение времени переходных процессов и перерегулирования, связанное с насыщением движителей.

Заключение. В ходе выполненных исследований синтезирован и исследован контур управления дифферентом, обеспечивающий малое перерегулирование (не более 5 %) и нулевые статические ошибки.

Исследование линеаризованного контура управления дифферентом позволяет сделать следующие важные для синтеза системы управления выводы:

- при отсутствии ПИ-регулятора наихудший случай устойчивости возникает при малом угле дифферента ($\vartheta \approx 0^\circ$), а при включении в СУ ПИ-регулятора наихудший случай устойчивости имеет место при большом угле дифферента ($\vartheta \approx \pm 90^\circ$);
 - в контуре управления угловым положением точка линеаризации по углу дифферента слабо влияет на устойчивость системы, что позволяет синтезировать СУ для любой точки линеаризации при оставлении небольшого запаса по перерегулированию;
 - введение в систему ПИ-регулятора позволяет устранить статическую ошибку от входного воздействия и внешнего возмущения;
- Результаты моделирования работы контура управления дифферентом с учетом нелинейностей позволяет сформулировать следующие выводы:
- введение в систему ПИ-регулятора с насыщением существенно улучшает качество переходных процессов по сравнению с применением ПИ-регулятора без насыщения;

– предложенный переменный (адаптивный) закон формирования предела интегрирования в ПИ-регуляторе позволяет обрабатывать все входные воздействия без статической ошибки и предотвращает лишнее перерегулирование, возникающее по причине слишком большого размера предела интегрирования.

Целями дальнейших исследований являются построение и изучение контура 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*. Москва, Изд-во МАИ, 1994, 304 с.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Лукомский Ю.А., Чугунов В.С. *Системы управления морскими подвижными объектами*. Ленинград, Судостроение, 1988, 272 с.
- [8] Гостилович С.О. Разработка и исследование системы управления движением подводного аппарата в вертикальной плоскости. Математическая модель подводного аппарата. *Политехнический молодежный журнал*, 2018, № 2(19). URL: <http://ptsj.ru/catalog/edu/phil/254.html> (дата обращения 12.02.2018).
- [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.

Гостилович Александр Олегович — студент кафедры «Инновационный менеджмент», МГУ им. М.В. Ломоносова, 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.

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF THE SUBMERSIBLE VERTICAL MOTION CONTROL SYSTEM. TRIM DIFFERENCE LOOP SYNTHESIS

S.O. Gostilovich¹

mmm333zzz@yandex.ru

SPIN-code: 8566-6499

A.O. Gostilovich²

gostaleks@mail.ru

SPIN-code: 8130-0979

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Abstract

On the basis of using the simplified mathematical model of the submersible by means of synthesis frequency methods we have constructed a trim angle control loop. While constructing a control loop we added position and velocity feedback. The investigation shows small dependence of the attitude position loop steadiness through the trim difference from the linearization point on the trim angle. The article justifies the application of the proportional plus reset controller with the integration limit for eliminating the steady-state errors caused by the input effect and external disturbances. In order to determine the proportional plus reset controller parameters we have used a simulation technique. The authors suggest an adaptive law of integration limit formation depending on the input effect. We simulate the operation of the trim difference control loop with due consideration of nonlinearity of the submersible model.

Keywords

Submersible, mathematical model, trim difference, vertical motion, linearized model, feedback, proportional plus reset controller, adaptive system, transfer-function, 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., 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.
- [4] 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], 2011, no. 1(11), pp. 24–31.
- [5] 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.

- [6] 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.
- [7] Lukomskiy Yu.A., Chugunov V.S. Sistemy upravleniya morskimi podvizhnymi ob’ektami [Control systems of marine vehicles]. Leningrad, Sudostroenie publ., 1988, 272 p.
- [8] Gostilovich S.O. Designing and vertical testing of the submersible motion control system. The mathematical model of the submersible. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2018, no. 2(19). URL: <http://ptsj.ru/catalog/edu/phil/254.html> (accessed 12.02.2018).
- [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.

Gostilovich A.O. — student, Department of Innovation Management, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation.

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