

А. А. Колесников, д-р техн. наук, проф., ankolesnikov@sfsedu.ru,

О. И. Якименко, аспирант, iakimenko_olga@mail.ru,

И. А. Радионов, канд. техн. наук, доц., radionovivan@sfsedu.ru, **Д. С. Калий**, аспирант, kaliy.d@yandex.ru,

Институт компьютерных технологий и информационной безопасности

Южного федерального университета, г. Таганрог

Сравнение методов классической и синергетической теорий управления движением автономного подводного аппарата

Рассмотрена проблема нелинейного синтеза законов управления движением автономного подводного аппарата (АПА) в вертикальной плоскости. Задачами синтеза являются выход подводного аппарата на заданную глубину с заданной скоростью. На основе нелинейной математической модели АПА выполнен синтез законов управления двумя различными способами: с использованием метода классической теории автоматического управления — пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (ПИД регулятора) и с использованием синергетической теории управления — метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). Классические методы теории автоматического управления предполагают линейное или линеаризованное математическое описание управляемых процессов и скалярное управление, что не может не сказаться как на адекватности математического описания процессов, так и на эффективности разработанных алгоритмов. Такие структуры оказываются малоэффективными, поскольку не позволяют получить необходимый запас устойчивости системы и являются приближенными. К тому же скалярный принцип управления часто ограничивает возможность эффективного воздействия на систему, игнорируя потенциальные каналы управления. Используемый в работе векторный принцип управления позволяет более эффективно воздействовать на систему через различные каналы управления. Предполагаемые законы синергетического управления наделяют рассматриваемый объект свойствами асимптотической устойчивости во всей допустимой области изменения переменных состояния.

Рассмотрены результаты компьютерного моделирования движения АПА, которые подтверждают достижение целей управления.

Ключевые слова: автономный подводный аппарат, система автоматического управления, математическая модель, ПИД регулятор, метод АКАР, инварианты, синтез регулятора, синергетическая теория управления

Введение

Решению проблемы синтеза систем управления подвижными объектами посвящено большое число научных статей [1—8]. Однако несмотря на определенное разнообразие предложенных вариантов практическое применение получили методы классической теории автоматического управления. В связи с этим нелинейная модель объекта обычно упрощалась путем линеаризации или отбрасывания некоторых элементов модели ввиду их незначительного влияния. Очевидно, что часть динамических свойств объекта, которую мог бы учесть синтезируемый регулятор, при этом неизбежно терялась. Такой подход приводит к неизбежной потере маневренности аппаратов, особенно в экстремальных режимах движения. Поэтому актуальной в настоящее время остается проблема синтеза законов автоматического управления на основе исходных нелинейных много-связных математических моделей движения объектов как наиболее точно отражающих их динамику с физической точки зрения.

Математическое описание объекта регулирования

При всем многообразии подводных аппаратов в характере их движения есть много общего. Уравнения движения автономного подводного аппарата (АПА) в связанной системе координат могут быть получены из законов механики как уравнения движения тела в жидкой среде. В данной работе рассматривается движение АПА, схематически представленного на рис. 1, в вертикальной плоскости.

Математическая модель движения АПА в вертикальной плоскости имеет следующий вид [9]:

$$\begin{aligned} m_x \frac{dV_x}{dt} - m_y \omega_z V_y &= T - qv^{2/3}(c_x^\alpha \alpha + c_x^\delta \delta_B), \\ m_y \frac{dV_y}{dt} + m_x \omega_z V_x &= qv^{2/3}(c_y^\alpha \alpha + c_y^\omega \omega_z + c_y^\delta \delta_B), \\ J_z \frac{d\omega_z}{dt} + V_x V_y (m_y - m_x) &= qv(m_z^\alpha \alpha + m_z^\omega \omega_z + m_z^\delta \delta_B), \quad (1) \\ \frac{dy_g}{dt} &= V_x \psi + V_y, \\ \frac{d\psi}{dt} &= \omega_z, \end{aligned}$$

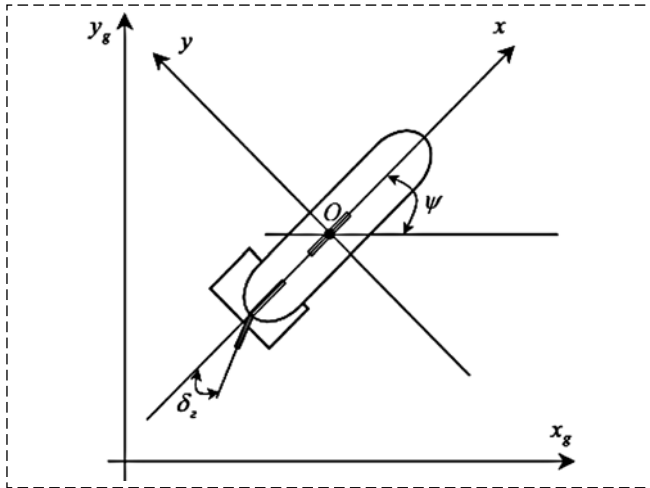


Рис. 1. Схема АПА
Fig. 1. AUV scheme

где V_x , V_y и ω_z — проекции на оси связанной системы координат вектора линейной скорости перемещения центра масс автономного подводного аппарата и вектора угловой скорости вращения автономного подводного аппарата относительно центра масс; x_g , y_g — координаты центра масс АПА в базовой системе координат; ψ — угол дифферента; m_x , m_y , J_z — элементы матрицы инерции твердого тела с учетом присоединенных масс жидкости; c_i^j и m_i^j — гидродинамические коэффициенты; $\alpha \approx -V_y/V$ — угол атаки; $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$ — скорость поступательного движения; q — скоростной напор, зависящий от плотности воды и скорости движения: $q = 0,5\rho V^2$; v — объемное водоизмещение аппарата; T — сила тяги по продольной оси OX , создаваемая тяговым движителем; δ_v — угол перекаладки вертикального руля.

Переменные состояния: $x_1 = V_x$, $x_2 = V_y$, $x_3 = \omega$, $x_4 = y_g$, $x_5 = \psi$ и управляющие воздействия: $u_1 = T$, $u_2 = \delta_v$.

Параметры модели (1) представлены ниже.

Параметры модели АПА

m_x , кг	110
m_y , кг	150
J_z , кг·м ²	1200
m_z^a , 1/°	-0,015
m_z^o , 1/°	-0,012
m_z^c , 1/°	-0,01
v , м ³	50
c_x^a , 1/°	0,01
c_x^o , 1/°	0,01
c_y^a , 1/°	0,01
c_y^o , 1/°	0,03
c_y^c , 1/°	0,01
ρ , кг/м ³	1000

Синтез системы управления с использованием ПИД регулятора

Наибольшее внимание специалистов по теории управления привлекает проблема адаптивного управления, о чем свидетельствует большое число публикаций на эту тему [10–14]. Качество адаптивной системы управления напрямую зависит от выбранного класса и структуры регулятора. Если основной регулятор достаточно адекватен задаче управления, то алгоритм адаптации обеспечит желаемое качество замкнутой системы. Однако синтез адекватной структуры регулятора представляет самостоятельную сложную задачу. Следует отметить, что в настоящее время в качестве основного регулятора наиболее часто выбираются простейшие типовые пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) или другие регуляторы с линейными законами управления. При таком выборе алгоритм адаптации позволяет подобрать параметры регулятора в соответствии с некоторым критерием оценки только лишь для узкого диапазона работы замкнутой системы. К тому же скалярный принцип управления часто ограничивает возможность эффективного воздействия на систему, игнорируя потенциальные каналы управления. Такой подход резко ограничивает возможности адаптивной системы управления, так как ее предельные свойства определяются линейными или типовыми законами управления, которые, как известно, эффективны лишь в качестве локальных регуляторов и оказались малопродуктивны при решении задач синтеза управления многосвязными нелинейными многомерными системами.

Рассматриваемый АПА (1) является существенно нелинейным объектом 5-го порядка с двумя каналами управления. Попробуем применить типовой ПИД закон управления для выполнения задачи погружения аппарата с постоянной скоростью для рассматриваемой модели в Simulink математического пакета MATLAB.

На рис. 2 представлена структурная схема АПА в математическом пакете Simulink MATLAB.

В данной схеме в блоке DEE1 записана рассматриваемая система (1) в виде дифференциальных уравнений. На входы подаются управляющие воздействия: u_1 — сила тяги по продольной оси OX , сформированная ПИД регулятором, и $u_2 = 0$ — угол перекаладки верти-

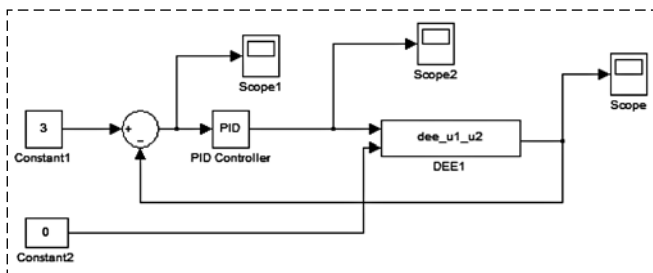


Рис. 2. Структурная схема АПА в Simulink MATLAB
Fig. 2. Block diagram of the AUV in Simulink MATLAB

кального руля. В данном случае рассматривается один канал управления, предполагающий движение аппарата на постоянной глубине.

Как известно, в установившемся режиме ПИД регулятор воздействует на выходную величину так, чтобы свести ошибку регулирования $e(t)$ к нулю. Ошибка регулирования представляет собой разность между заданным значением и значением управляемой (выходной) переменной объекта. Принцип ПИД регулятора основывается на уравнении, представля-

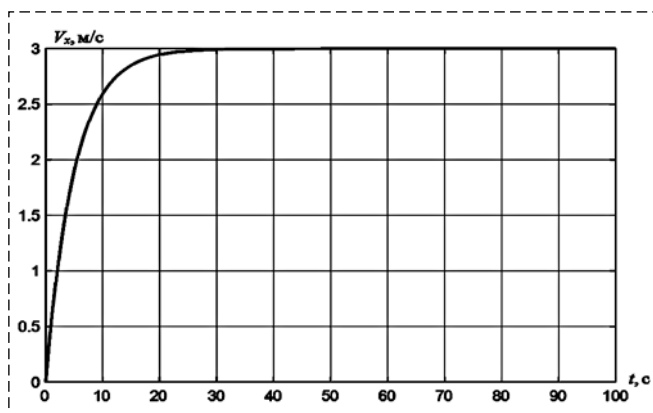


Рис. 3. График проекции на ось OX вектора линейной скорости перемещения центра масс АПА

Fig. 3. Graph of the projection onto the axis OX of the linear velocity vector of the AUV center of mass

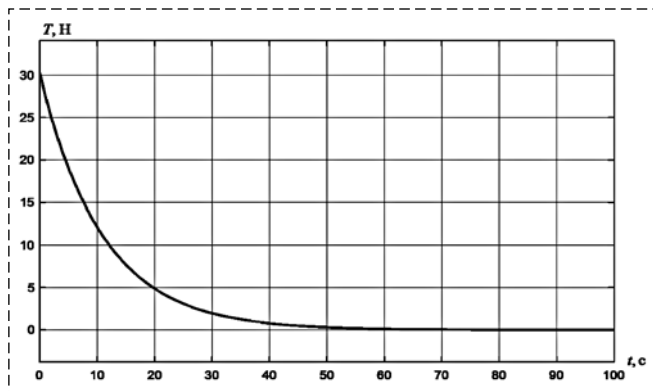


Рис. 4. График силы тяги по продольной оси OX

Fig. 4. Traction force graph along the longitudinal axis OX

ющем регулирующее воздействие как сумму пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих:

$$u(t) = k_p e + k_i \int_0^t e dt + k_d \frac{de}{dt}. \quad (2)$$

Существуют различные процедуры для нахождения коэффициентов регулятора такого типа, также есть и средства автоматического поиска коэффициентов. Применяя их в совокупности, получаем $k_p = 10$, $k_i = 0,001$, $k_d = 0,1$. При найденных значениях регулятора для движения аппарата с постоянной скоростью $x_1 = 3$ проведено компьютерное моделирование. На рис. 3, 4 представлены графики проекции на ось OX вектора линейной скорости перемещения центра масс АПА и силы тяги по оси OX в базовой системе координат. Можно заметить, что регулятор отрабатывает достижение одной поставленной цели. Но при изменении значения управляющего воздействия u_2 регулятор уже не отрабатывает выполнение рассматриваемой задачи, для достижения цели необходимо будет заново выбирать коэффициенты регулятора. Для синтеза нелинейных законов, обеспечивающих выполнение нескольких целей управления (например, движение с желаемой скоростью на заданной глубине), ПИД регулятор применить проблематично. Как известно, в регуляторах такого типа при подборе коэффициентов используется линеаризация, и если для одного канала управления такая процедура еще уместна, то для нескольких — нет. Нетрудно заметить, что в модели (1) присутствуют перекрестные обратные связи, и использование линеаризации в данном случае нерационально.

В связи с этим рассмотрим синтез нелинейного регулятора с двумя каналами управления, обеспечивающего выполнение двух технологических целей по процедуре синергетического синтеза методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов.

Описание процедуры синергетического синтеза регулятора

Для решения задачи синтеза будем использовать метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) синергетической теории управления (СТУ) [15–18]. СТУ — это новое направление в общей теории

управления, которое базируется на принципах направленной самоорганизации и динамической декомпозиции синтезируемых нелинейных систем на притягивающих инвариантных многообразиях (ИМ). Анализ движения объекта можно проводить с учетом всех координат системы, т. е. в отличие от традиционного подхода — конструирования отдельного стабилизирующего управления для каждого канала регулирования — в этом подходе используется совместное управление по всем переменным в целях перевода объекта в желаемое состояние. В этом случае для ряда вариантов алгоритмов управления связи между каналами управления осуществляются не косвенно, через объект управления, а непосредственно формируются в регуляторе.

В синергетической теории управления набор инвариантов должен отражать цели управления объектом. Число инвариантов всегда соответствует числу имеющихся каналов управления. В рассматриваемом случае необходимо обеспечить выход АПА на заданную глубину с заданной скоростью. Иными словами, в модели (1) выделяются два канала управления: сила тяги по продольной оси OX , создаваемая тяговым движителем, и угол перекладки вертикального руля, и, соответственно, два инварианта системы — заданная глубина и заданная скорость движения АПА.

Согласно процедуре АКАР введем совокупность ИМ следующего вида:

$$\begin{aligned}\psi_1 &= x_2 - \varphi_1 = 0; \\ \psi_2 &= x_1 - x_1^* = 0.\end{aligned}\quad (3)$$

Как видно из соотношений (3), на переменную x_4 в данном случае будем влиять через переменную x_2 , где φ_1 — пока неизвестная функция переменных состояния.

Запишем декомпозированную систему, которая имеет третий порядок. Очевидно, что одна из целей управления $x_1 = x_1^*$ уже достигнута на $\psi_2 = 0$:

$$\begin{aligned}\dot{x}_3 &= \frac{qv(m_z^\alpha \alpha + m_z^\omega x_3 + m_z^\delta u_2) - x_1^* \varphi_1 (m_y - m_x)}{J}; \\ \dot{x}_4 &= x_1^* x_5 + \varphi_1; \\ \dot{x}_5 &= x_3.\end{aligned}\quad (4)$$

Функцию φ_1 можно рассматривать как "внутреннее" управляющее воздействие для декомпозированной системы (4) и можно повторить

процедуру, тем самым реализуя принцип последовательной декомпозиции. Для достижения цели управления $x_4 = x_4^*$ введем еще одно инвариантное многообразие: $\psi_3 = x_4 - x_4^* = 0$.

Функция φ_1 ищется из решения функционального уравнения $T_3 \psi_3 + \psi_3 = 0$, т. е. $T_3(x_1^* x_5 + \varphi_1) + x_4 - x_4^* = 0$ в силу системы (4), где T определяет быстродействие регулятора.

Получаем выражение для $\varphi_1 = -\frac{T_3 x_1^* x_5 + x_4 - x_4^*}{T_3}$ и, подставляя его в (3), находим $\psi_1 = x_2 + \frac{T_3 x_1^* x_5 + x_4 - x_4^*}{T_3}$. Аналогично записываем функциональные уравнения для ψ_1, ψ_2 :

$$\begin{aligned}T_1 \left(\frac{qv^{2/3}(c_y^\alpha \alpha + c_y^\omega x_3 + c_y^\delta u_2) - m_x x_3 x_1}{m_y} + \right. \\ \left. + \frac{x_1 x_5 + x_2}{T_3} + x_1^* x_3 \right) + x_2 + \frac{T_3 x_1^* x_5 + x_4 - x_4^*}{T_3} = 0; \quad (5) \\ \frac{T_2(u_1 - qv^{2/3}(c_x^\alpha \alpha + c_x^\delta u_2) + m_y x_3 x_2)}{m_x} + x_1 - x_1^* = 0.\end{aligned}$$

Решая систему (5), находим искомые законы управления:

$$\begin{aligned}u_1 &= (T_2 qv^{2/3} c_x^\alpha \alpha T_1 T_3 c_y^\delta - T_2 c_x^\delta T_1 T_3 qv^{2/3} c_y^\alpha \alpha - \\ &- T_2 c_x^\delta T_1 T_3 qv^{2/3} c_y^\omega x_3 - T_2 c_x^\delta T_1 x_1^* x_3 m_y T_3 + \\ &+ T_2 c_x^\delta T_1 T_3 m_x x_3 x_1 - T_2 c_x^\delta T_1 m_y x_1 x_5 - T_2 c_x^\delta T_1 m_y x_2 + \\ &+ T_2 c_x^\delta m_y x_4^* - T_2 c_x^\delta x_2 m_y T_3 - T_2 c_x^\delta m_y T_3 x_1^* x_5 - \\ &- T_2 c_x^\delta m_y x_4 - T_2 m_y x_3 x_2 T_1 T_3 c_y^\delta - \\ &- x_1 m_x T_1 T_3 c_y^\delta + x_1^* m_x T_1 T_3 c_y^\delta) / (T_2 T_1 T_3 c_y^\delta), \\ u_2 &= -(T_1 T_3 qv^{2/3} c_y^\alpha \alpha + T_1 T_3 qv^{2/3} c_y^\omega x_3 + \\ &+ T_1 x_1^* x_3 m_y T_3 - T_1 T_3 m_x x_1 x_3 + T_1 m_y x_1 x_5 + \\ &+ T_1 m_y x_2 - m_y x_4^* + x_2 m_y T_3 + \\ &+ m_y T_3 x_1^* x_5 + m_y x_4) / (T_1 T_3 qv^{2/3} c_y^\delta).\end{aligned}\quad (6)$$

При заданных инвариантах $x_1^* = 3$, $x_4^* = -20$ системы (1) и при $T_1 = T_2 = T_3 = 5$ в идеализированных условиях, когда внешнее сопротивление не действует, графики переходных процессов переменных состояния имеют вид, представленный на рис. 5, 6.

Анализируя полученные графики движения АПА в идеализированных условиях в вертикальной плоскости, представленные на рис. 5, 6, можно заметить, что регулятор работает исправно — АПА выходит на заданную

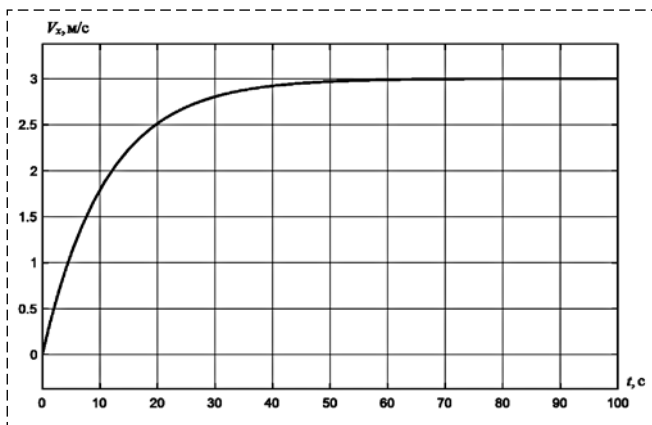


Рис. 5. График проекции на ось OX вектора линейной скорости перемещения центра масс АПА

Fig. 5. Graph of the projection onto the axis OX of the linear velocity vector of the center of mass AUV

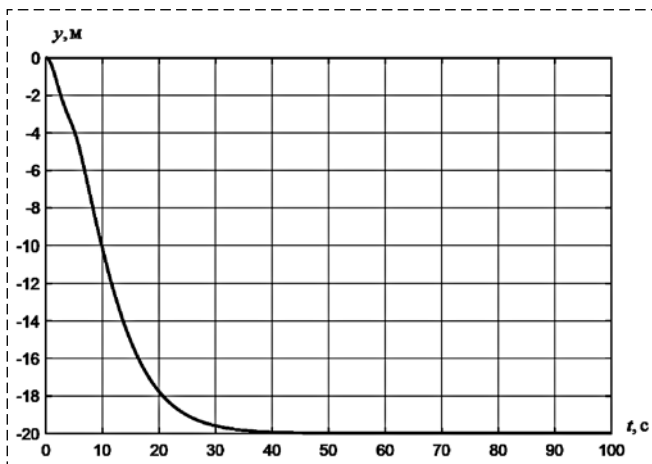


Рис. 6. График координаты центра масс АПА в базовой системе координат

Fig. 6. Graph coordinates of the AUV center of mass in the base coordinate system

глубину с заданной скоростью, т. е. достигают инварианты системы.

Заключение

В данной работе показана возможность синтеза алгоритмов автоматического управления АПА на основе нелинейного математического описания для движения в вертикальной плоскости. Найденный ПИД регулятор позволил выполнить одну цель управления — погружение аппарата с постоянной скоростью. Для линейных объектов данный регулятор, вне сомнения, будет эффективен, но для рассматриваемой нелинейной модели АПА целесообразнее использовать метод АКАР синергетической теории управления. Найденный этим методом закон управления обеспечивает

достижение одновременно двух целей управления: выход автономного подводного аппарата на заданную глубину с заданной скоростью. В подтверждение работоспособности регулятора проведено компьютерное моделирование поведения системы с учетом параметров исследуемого технического объекта.

Список литературы

1. Тарасов Н. Н., Тахтамышев М. Г. Алгоритм принятия решений при управлении балластной системой подводного аппарата // Проблемы управления. 2011. № 1. С. 74—77.
2. Евстигнеева Л. В., Тарасов Н. Н., Тахтамышев М. Г. Синтез алгоритма для одной задачи управления морскими подвижными объектами // Проблемы управления. 2007. № 4. С. 84—88.
3. Ивель В. П., Герасимова Ю. В. Адаптивная система вертикального позиционирования автономного подводного аппарата // Наука и мир. 2014. Т. 1. № 2(6). С. 161—164.
4. Чернухин Ю. В. Искусственный интеллект и нейрокompьютеры. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1997. 273 с.
5. Пшихопов В. Х., Чернухин Ю. В., Федотов А. А. Разработка интеллектуальной системы управления автономного подводного аппарата // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2014. № 3. С. 87—101.
6. Nyakudome T. Design of Autonomous Underwater Vehicle // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2011. Vol. 8, N. 1. P. 131—139.
7. Бочаров Л. Необитаемые подводные аппараты: состояние и общие тенденции развития // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2009. № 7. С. 62—69.
8. Бардачевский Н. Н., Безсуднов Е. Ю. Состояние и перспективы применения необитаемых подводных аппаратов в области гидрографических исследований и подводной навигации // Сборник материалов международной научной конференции "СибОптика-2013", 2013. Новосибирск: СГГА. Т. 2. С. 124—128.
9. Лукомский Ю. А., Лукомский Ю. А., Чугунов В. С. Системы управления морскими подвижными объектами. Л.: Судостроение, 1988. 272 с.
10. Тарасов Н. Н., Тахтамышев М. Г. Алгоритм принятия решений при управлении балластной системой подводного аппарата // Проблемы управления. 2011. № 1. С. 74—77.
11. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 549 с.
12. Дружинина М. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Методы адаптивного управления нелинейными объектами по выходу // Автоматика и телемеханика. 1996. № 2. С. 3—33.
13. Перельман И. И. Анализ современных методов адаптивного управления с позиции приложения автоматизации технологических процессов // Автоматика и телемеханика. 1991. № 7. С. 3—32.
14. Мирошник И. В., Никифоров В. О. Адаптивное управление пространственным движением нелинейных объектов // Автоматика и телемеханика. 1991. № 7. С. 78—87.
15. Колесников А. А. Синергетическая теория. М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.
16. Синергетика: процессы самоорганизации и управления: часть 2 / Под общ. Ред. А. А. Колесникова. Таганрог: ТРТУ, 2005. 358 с.
17. Колесников А. А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. М.: Едиториал УРСС / КомКнига, 2012. 240 с.
18. Современная прикладная теория управления. Ч. II: синергетический подход в теории управления / Под ред. А. А. Колесникова. М.: ФЦ "Интеграция", Таганрог: изд-во ТРТУ, 2000. 559 с.

Comparison of the Methods of Classical and Synergetic Theories of Control of the Movement Autonomous Underwater Machine

A. A. Kolesnikov, ankolesnikov@sfnu.ru, O. I. Yakimenko, iakimenko_olga@mail.ru,
I. A. Radionov, radionovivan@sfnu.ru, D. S. Kaliy, kaliy.d@yandex.ru
Institute of computer technology and information security "Southern Federal University",
Taganrog, 347900, Russian Federation

Corresponding author: **Kolesnikov Anatoly A.**, D. Sc., Professor,
Institute of computer technology and information security "Southern",
e-mail: ankolesnikov@sfnu.ru

Accepted on March 28, 2019

Abstract

The article deals with the problem of nonlinear synthesis of the laws of motion control of an autonomous underwater vehicle (APA) in the vertical plane. The tasks of the synthesis are the output of the underwater vehicle to a predetermined depth at a given speed. Based on the non-linear mathematical model of the APA, the control laws are synthesized by two different approaches: using the classical automatic control theory method, the proportional-integral-differential controller (PID controller), and using the synergetic control theory, the analytical design method for aggregated regulators (ADAR). Classical methods of the theory of automatic control assume a linear or linearized mathematical description of controlled processes and scalar control, which cannot but affect the adequacy of the mathematical description of processes and the efficiency of the developed algorithms. Such structures are ineffective because they do not allow to obtain the necessary stability margin of the system and are approximate. In addition, the scalar control principle often limits the ability to effectively influence the system, ignoring potential control channels. The vector control principle used in the work allows to more effectively influence the system through various control channels. The assumed laws of synergetic control endow the object in question with properties of asymptotic stability in the entire admissible region of change of state variables.

The results of computer simulation of the APA motion, which confirm the achievement of control goals, are considered.

Keywords: autonomous underwater vehicle, automatic control system, mathematical model, PID controller, ADAR method, invariants, controller synthesis, synergistic control theory

For citation:

Kolesnikov A. A., Yakimenko O. I., Radionov I. A., Kaliy D. S. Comparison of the Methods of Classical and Synergetic Theories of Control of The Movement Autonomous Underwater Machine, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 11, pp. 663–668.

DOI: 10.17587/mau.20.663-668

References

1. Tarasov N. N., Tahtamyshev M. G. *Control problems*, 2011, no. 1, pp. 74–77 (in Russian).
2. Evstigneeva L. V., Tarasov N. N., Tahtamyshev M. G. *Control problems*, 2007, no. 4, pp. 84–88 (in Russian).
3. Ivel' V. P., Gerasimova Yu. V. *Nauka i Mir*, 2014, vol. 1, no. 2(6), pp. 161–164 (in Russian).
4. Chernuhin Yu. V. *Artificial Intelligence and Neurocomputers*, Taganrog, Publishing house of TRTU, 1997, 273 p. (in Russian).
5. Pshihopov V. H., Chernuhin Yu. V., Fedotov A. A. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2014, no. 3, pp. 87–101 (in Russian).
6. Hyakudome T. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2011, vol. 8, no. 1, pp. 131–139.
7. Bocharov L. *Ehlektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes*, 2009, no. 7, pp. 62–69 (in Russian).
8. Bardachevskij N. N. *Sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "SibOptika-2013"*, 2013, Novosibirsk, SGGA, vol. 2, pp. 124–128 (in Russian).
9. Lukomskij Yu. A., Chugunov V. S. *Marine Mobile Control Systems*, Leningrad, Sudostroenie, 1988, 272 p. (in Russian).
10. Tarasov N. N., Tahtamyshev M. G. *Problemy upravleniya*, 2011, no. 1, pp. 74–77 (in Russian).
11. Miroshnik I. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L. *Nonlinear and adaptive control of complex dynamic systems*, SPb., Nauka, 2000, 549 p. (in Russian).
12. Druzhinina M. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L. *Avtomatika i Telemekhanika*, 1996, no. 2, pp. 3–33 (in Russian).
13. Perel'man I. I. *Avtomatika i Telemekhanika*, 1991, no. 7, pp. 3–32 (in Russian).
14. Miroshnik I. V., Nikiforov V. O. *Avtomatika i Telemekhanika*, 1991, no. 7, pp. 78–87 (in Russian).
15. Kolesnikov A. A. *Synergetic control theory*, Moscow, Ehnergoatomizdat, 1994, 344 p. (in Russian).
16. Kolesnikov A. A. ed. *Synergetics: processes of self-organization and control*, Taganrog, Publishing house of, TRTU, 2005, 358 p. (in Russian).
17. Kolesnikov A. A. *Synergetic methods of control of complex systems: the theory of system synthesis*, Moscow, Editorial URSS, KomKniga, 2012, 240 p. (in Russian).
18. Kolesnikov A. A. *Modern applied control theory. Part II: a synergistic approach to control theory*, Moscow, FC "Integratsiya", Taganrog, publishing house, TRTU, 2000, 559 p. (in Russian).