

Управление распределенными системами подводной робототехники с использованием адаптивной эталонной модели

В.Х. Пилюхов, В.А. Шевченко, М.Ю. Медведев, Б.В. Гуренко

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: В работе представлен подход, позволяющий организовать групповое управление подводных аппаратов на основе, многоконтурного алгоритма адаптации позиционно-траекторной системы управления подвижным объектом, с контуром оценивания неизмеряемых параметров, эталонной моделью и контуром обеспечения астатизма 2-го порядка. Оценка неизмеряемых возмущений на верхнем уровне управления в составе эталонной модели, что позволяет обеспечить высокую точность конечного позиционирования ведущего АНПА в целевой точке, заданной в качестве параметра эталонной модели. Применение разработанного алгоритма целесообразно в системах группового управления подвижными объектами, когда один объект из группы является ведущим, а его параметры используются в качестве параметров эталонной модели. В системе управления ведущего подвижного объекта используется адаптивная система управления с оцениванием возмущений. В системах управления ведомых подвижных объектов используются системы позиционно-траекторного управления с астатизмом второго порядка, что позволяет обеспечивать высокоточное слежение за движением эталонного подвижного объекта.

Ключевые слова: групповое управление, АНПА, адаптивное управление, эталонная модель, позиционно-траекторное управление, наблюдатель, оценка параметров, подвижный объект

Введение

В настоящее время постоянно расширяются исследования океанов и морей в плане не только научных океанологических исследований, но и в целях решения прикладных, производственных и военных задач, связанных с применением глубоководной техники различных типов. В решении этих задач все возрастающую роль играют автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), объединённые в группы и базирующиеся на различных типах доках: береговых, подводных, донных, подвижных, на кораблях носителях. Такая идея распределения единой задачи на группу робототехнических средств получила широкое распространение, а такой подход повышает эффективность использования АНПА и комплексов в целом.

Одной из основных проблем создания АНПА, способных решать современные задачи исследования морских пространств, является разработка высокоэффективных автоматических систем управления движением АНПА. На практике, в морской глубине постоянно возникают факторы, которые невозможно предвидеть при разработке программы исследования. Поэтому системы автоматического управления движением АНПА должны быть как минимум адаптивными, а лучше – интеллектуальными.

Так, для безопасного функционирования АНПА совместно с другими средствами подводной робототехники, системе управления АНПА необходимо осуществлять точное позиционирование и движение аппарата вдоль заданных траекторий. Такая операция под водой затрудняется наличием подводных течений и завихрений, вызванных работой винтов. Приведение АНПА к подводным причальным сооружениям, стыковка с ними в автоматическом режиме с высокой точностью позволяет минимизировать риск аварийных столкновений.

При синтезе законов управления для АНПА наиболее часто применяют линейные регуляторы с разделением движения на продольную, поперечную составляющие. Реже используются многосвязные нелинейные модели. Также можно выделить адаптивные и неадаптивные системы управления подвижными объектами.

Применение принципа управления нелинейными системами, основанного на построение адаптивной системы, временные характеристики которой наилучшим образом соответствует характеристике некоторой эталонной или идеализированной модели, было предложено в 1960 гг. [1 – 3]. В настоящее время адаптивное управление с эталонной моделью [4 – 6] находит применение в разрабатываемых системах автоматического управления морскими, воздушными и наземными подвижными объектами [7 – 8], группами подвижных объектов [9, 10], а так же, стационарными

энергетическими объектами [11, 12]. Задача слежения за выходными параметрами эталонной модели накладывает на нее определенные требования к точности и устойчивости, что не позволяет использовать реальный объект в качестве такой модели. В задачах группового управления, для использования одного из объектов, в качестве ведущего, а так же, в случаях, когда на эталонную модель могут воздействовать внешние факторы или некоторые параметры модели не могут быть измерены, могут быть применены алгоритмы оценивания внешних и параметрических возмущений [13, 14].

В данной работе рассматривается задача разработки алгоритма прямого адаптивного управления АНПА, функционирующего в группе, на базе позиционно-траекторного метода [15, 16] с эталонной моделью и контуром оценивания неизмеряемых параметров.

Синтез наблюдателя неизмеряемых параметров эталонной модели

Рассмотрим модель подвижного объекта на базе уравнений кинематики и динамики твердого тела [17]:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= R(y)x, \\ \dot{x} &= M^{-1}(F_u + F_d), \end{aligned} \tag{1}$$

где y – вектор линейных и угловых положений подвижного объекта во внешней системе координат; x – вектор линейных и угловых скоростей подвижного объекта в связанной системе координат; $R(y)$ – матрица кинематики; M – матрица инерционных параметров; F_u – вектор управляющих сил и моментов; F_d – вектор прочих сил и моментов, действующих на подвижный объект.

Наряду с моделью (1) рассмотрим эталонный подвижный объект вида:

$$\begin{aligned} \dot{y}_m &= R(y_m)x_m, \\ \dot{x}_m &= M^{-1}(F_{um} + F_{dm}), \end{aligned} \tag{2}$$

где y_m – вектор линейных и угловых положений эталонного подвижного объекта во внешней системе координат; x_m – вектор линейных и угловых скоростей эталонного подвижного объекта в связанной системе координат; $R(y_m)$ – матрица кинематики эталонного подвижного объекта; F_{um} – вектор управляющих сил и моментов эталонного подвижного объекта; F_{dm} – вектор прочих сил и моментов, действующих на номинальную модель.

Матрица $R(y_m)$ и вектор F_{dm} совпадают по структуре с матрицей $R(y)$ и вектором F_d соответственно.

Для оценивания неизмеряемых параметров и действующих возмущений на эталонный подвижный объект воспользуемся методом оценивания [14, 15]. В случае влияния некоторого неизмеряемого воздействия вектор прочих сил и моментов модели (2) примет вид:

$$F_{dm} = F_{dm0} + f_{dnv} \quad (3)$$

Введем ошибку наблюдения, как разницу между реальным значением воздействия и его оценкой \hat{f}_{dnv} :

$$e_n = f_{dnv} - \hat{f}_{dnv} \quad (4)$$

В соответствии с процедурой синтеза редуцированных наблюдателей [15] определим уравнение оценки наблюдений следующим образом:

$$\hat{f}_{dnv} = S(x_m) + \hat{z} \quad (5)$$

где $S(x_m)$ – неизвестная вектор-функция, подлежащая определению, \hat{z} – вектор новых переменных.

Тогда ошибку наблюдения (4) с учетом (5) можно записать, как:

$$e_n = f_{dnv} - S(x_m) - \hat{z} \quad (6)$$

Производная от ошибки e_n примет вид:

$$\dot{e}_n = \dot{f}_{dnv} - \frac{\partial S}{\partial x_m} \dot{x}_m - \dot{\hat{z}} \quad (7)$$

Для обеспечения асимптотической сходимости оценки, потребуем, чтобы ошибка e_n удовлетворяла эталонному дифференциальному уравнению:

$$\dot{e}_n + a_1 \cdot e_n = 0 \quad (8)$$

Подставив (4) – (7) в уравнение (8), получим:

$$-\frac{\partial S}{\partial x_m}(M^{-1}(F_{um} + F_{dm} + f_{dnv})) - \dot{\hat{z}} + a_1(f_{dnv} - S(x_m) - \hat{z}) = 0 \quad (9)$$

Определение неизвестной функции $S(x_m)$ необходимо производить из расчета, чтобы уравнение (9) не зависело от неизмеряемого воздействия f_{dnv} , таким образом, уравнение (9) будет описывать асимптотический наблюдатель. При этом оценка неизмеряемой величины \hat{f}_{dnv} будет определяться в соответствии с (5). Чтобы (9) не зависило от f_{dnv} , все слагаемые, содержащие этот множитель, приравняем к нулю и определим $S(x_m)$:

$$-\frac{\partial S}{\partial x_m}(M^{-1} \cdot f_{dnv}) + a_1 \cdot f_{dnv} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial S}{\partial x_m} = a_1 \cdot (M^{-1})^{-1} = a_1 \cdot M \quad (11)$$

$$S(x_m) = a_1 \cdot M \cdot x_m \quad (12)$$

Перепишем (9) и (6) с учетом (11), (12) и выразим производную вектора новых переменных \hat{z} и оценку \hat{f}_{dnv} :

$$-Ma_1(M^{-1}(F_{um} + F_{dm})) - \dot{\hat{z}} - a_1^2 Mx_m - a_1 \hat{z} = 0 \quad (13)$$

$$\dot{\hat{z}} = -Ma_1(M^{-1}(F_{um} + F_{dm})) - a_1^2 Mx_m - a_1 \hat{z} \quad (14)$$

$$\hat{f}_{dnv} = a_1 Mx_m + \hat{z} \quad (15)$$

Уравнения (14), (15) являются искомыми уравнениями наблюдателя, применение которого в процессе синтеза регулятора позволит компенсировать влияние неизмеряемых воздействий на устойчивость всей системы.

Для синтеза управления объектом (2) воспользуемся процедурой, описанной в [12, 17]. Определим ошибку позиционирования в виде:

$$e_m = A_1 y_m + A_2 \quad (16)$$

где A_1 и A_2 – матрица и вектор постоянных коэффициентов, отражающих требования к точке позиционирования.

Потребуем, чтобы ошибка e_m удовлетворяла эталонному дифференциальному уравнению (17) и определим первую и вторую производную по времени от ошибки позиционирования:

$$\ddot{e}_m + T_2 \dot{e}_m + T_1 e_m = 0 \quad (17)$$

$$\dot{e}_m = A_1 R(y_m) x_m \quad (18)$$

$$\ddot{e}_m = A_1 \dot{R}(y_m) x_m + A_1 R(y_m) M^{-1} (F_{um} + F_{dm0} + \hat{f}_{dnv}) \quad (19)$$

Из (17), с учетом (18), (19) определим вектор управляющих сил и моментов:

$$F_{um} = -F_{dm0} - \hat{f}_{dnv} + (A_1 R(y_m) M^{-1})^{-1} \{-A_1 \dot{R}(y_m) x_m - T_2 \dot{e}_m - T_1 e_m\} \quad (20)$$

Модель эталонного подвижного объекта (2) с учетом (20), (14), (15) примет вид:

$$\begin{cases} \dot{y}_m = R(y_m) x_m, \\ \dot{x}_m = M^{-1} (f_{dnv} - \hat{f}_{dnv}) + (A_1 R(y_m))^{-1} (-A_1 \dot{R}(y_m) x_m - T_2 \dot{e}_m - T_1 e_m). \end{cases} \quad (21)$$

Синтез контура управления подвижным объектом (1) произведем в соответствии с [17], где вводятся ошибки позиционирования объекта управления в виде $e = A_1 y - A_1 y_m + B_1 z_1 + B_2 z_2$, $\dot{z}_1 = z_2$, $\dot{z}_2 = A_1 y - A_1 y_m$, где z_1, z_2 – векторы дополнительных переменных; $B_i, i = 1, 2$ – матрицы произвольных коэффициентов настройки регулятора.

Таким образом, вектор управляющих сил и моментов примет следующий вид:

$$F_u = -F_d + (A_1 R M^{-1})^{-1} * \left\{ -A_1 \dot{R}x + A_1 \dot{R}_m x_m + A_1 R_m \dot{x}_m - B_1 (A_1 y - A_1 y_m) - B_2 (A_1 R(y)x - A_1 R(y_m)x_m) - T_2 \dot{e} - T_1 e \right\} \quad (22)$$

Контур управления подвижным объектом (1), с учетом (22), описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \dot{y} = R(y)x, \\ \dot{x} = (A_1 R)^{-1} \left\{ -A_1 \dot{R}x + A_1 \dot{R}_m x_m + A_1 R_m \dot{x}_m - B_1 (A_1 y - A_1 y_m) - B_2 (A_1 R(y)x - A_1 R(y_m)x_m) - T_2 \dot{e} - T_1 e \right\}. \end{cases} \quad (23)$$

Устойчивость полученной замкнутой системы исследована в [17], где доказано, что система асимптотически устойчива по Ляпунову.

Моделирование движения группы АНПА

Моделирование группового перемещения будем проводить с регулятором на основе адаптивного алгоритма управления с наблюдателем неизмеряемых возмущений эталонного подвижного объекта.

Для моделирования системы управления автономного необитаемого подводного аппарата воспользуемся данными, представленными в работе [11]. Основным параметрам регулятора заданы следующие значения: $T_1 = 0,25I$, $T_2 = I$, $A_1 = I$, $A_2 = -[10+t \ 10 \ 10 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, $B_1 = 10I$, $B_2 = 25I$, где I – единичная матрица размерностью 6×6 .

Неизмеряемое параметрическое и внешнее возмущение, действующее на объект управления:

$$F_v = 0,2F_d^0 + [5 \ -3 + \sin(0,5t) \ 2 + \cos(0,4t) \ 0 \ 0 \ 0]^T. \quad (24)$$

Неизмеряемое параметрическое и внешнее возмущение, действующее на эталонный подвижный объект, так же принято в форме (24), с коэффициентом усиления $k=10$: $f_{div} = kF_v$. Коэффициент быстрогодействия наблюдателя $a_1=10$.

В качестве эталонной модели выступает АНПА №1 (рисунок 1). Задача системы управления обеспечить устойчивое функционирование объекта 1, по

средствам оценивания и подавления влияния внешних возмущений, а так же управлять объектами 2-5 по принципам следящей системы за выходными параметрами эталонной модели. Проведем моделирование системы управления для случая, когда объекты 1-5 начинают движение в нулевой точке координат, а в установившемся режиме двигаются параллельно, на расстоянии 1 метр друг от друга по оси Z, на одной глубине. Для этого в ошибку позиционирования объекта управления и вектор дополнительных переменных введем дополнительный коэффициент ошибки $k_e = A_1 \cdot [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, таким образом, что $e = A_1 y - A_1 y_m + B_1 z_1 + B_2 z_2 + k_e$, $\dot{z}_1 = z_2$, $\dot{z}_2 = A_1 y - A_1 y_m + k_e$.

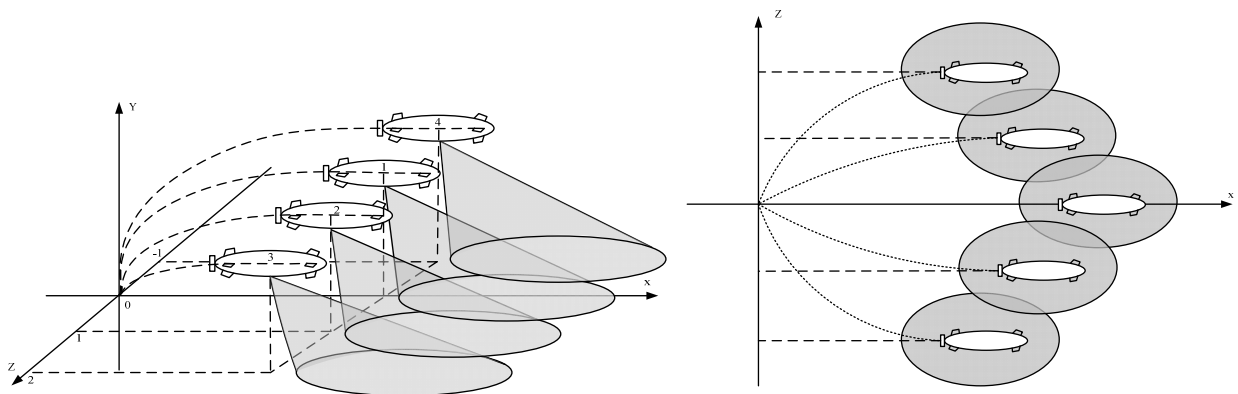


Рис. 1. – Траектория движения группы из 5 подвижных объектов

При моделировании движения АНПА без наблюдателя неизмеряемых возмущений в эталонном подвижном объекте с внешним воздействием $f_{div} = kF_v$ система теряет устойчивость. Синтезированный регулятор эталонной модели способен сохранить устойчивость при уровне внешнего возмущающего воздействия F_v . Из рисунка 2 видно, что с постоянными и линейными возмущениями позиционно-траекторный регулятор справляется с высокой степенью качества (рисунок 2,а), а в случае нелинейного, в частности синусоидального, возмущающего воздействия в установившемся режиме наблюдаются колебательные включения пропорциональные амплитуде возмущения (рисунок 2,б и 2,а).

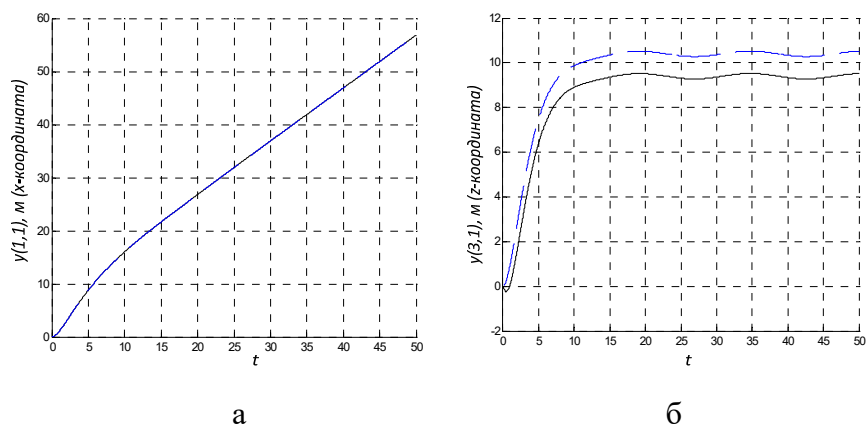


Рис. 2 – Линейные положения АНПА при воздействии внешних возмущений на эталонную модель: а) x-координата; б) z-координата

Результаты моделирования работы наблюдателя представлены на рисунке 3, где значения неизмеряемого воздействия на эталонный подвижный объект обозначены маркером «+», а результат оценивания этого воздействия обозначен маркером «o». Т.к. f_{dnv} является матрицей размерности 6×1 , на рисунке отображены все шесть графиков переменных, входящих в модель неизмеряемого воздействия.

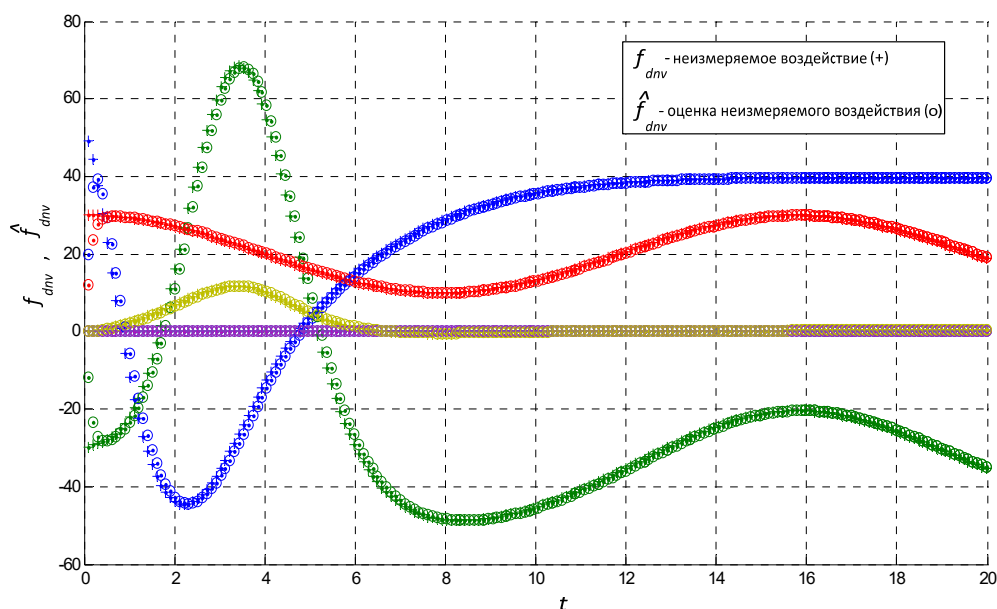


Рис. 3 – Уровень неизмеряемых возмущений и их оценка

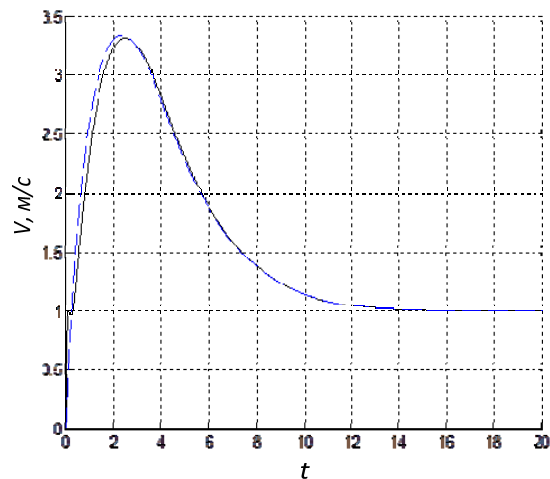


Рис. 4 – Линейная скорость АНПА

На рисунках 4, 5, 6 отображены графики линейной скорости и линейных положений АНПА задающей эталонной модели, на графиках изображены пунктирной линией, и объекта управления, на графиках изображены сплошной линией. Из рисунка 6 видно, что движение объекта 1 (эталонной модели) и объектов 2-5 (объекта управления) происходит синхронно на одной глубине и с одинаковой скоростью по X, из рисунка 5 видно, что эти объекты в установившемся режиме двигаются на расстоянии 1 метр друг от друга.

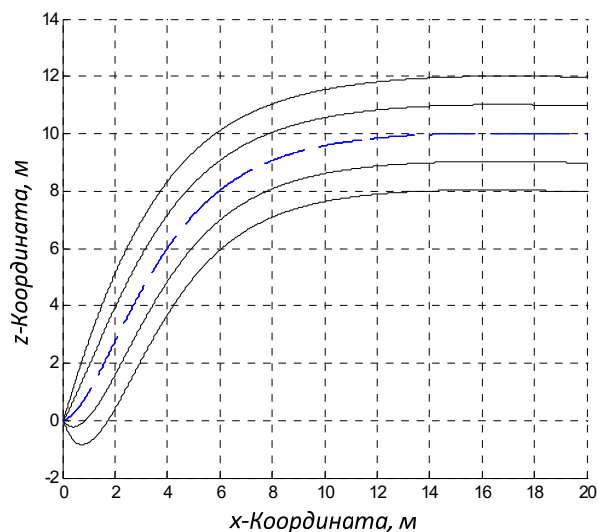


Рис. 5 – Траектория движения 5-и АНПА при оценивании возмущений, действующих на эталонную модель

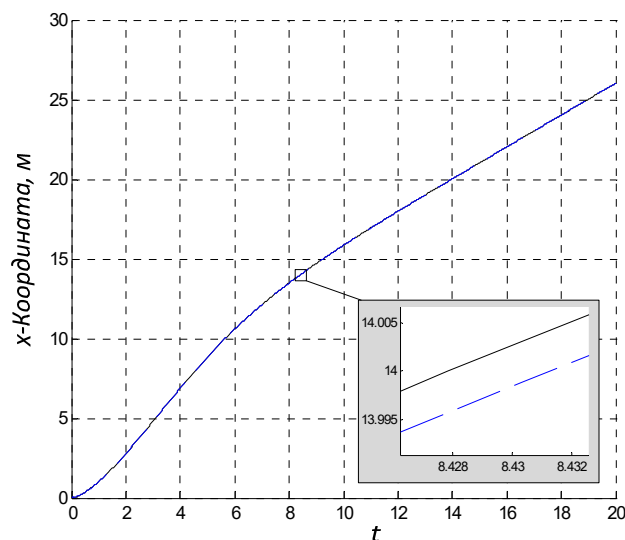


Рис. 6 – Линейные положения АНПА при оценивании возмущений, действующих на эталонную модель (пунктир – траектория движения эталонной модели, сплошная – траектория движения АНПА №1)

Структура системы управления АНПА

При разработке системы управления необходимо выделить ее основные блоки. Для объединения блоков в цепочку разрабатывается структурная схема (см. рис. 7).

В структурной схеме системы управления АНПА, представленной на рисунке 7, автопилот формирует управляющие воздействия на основе координат точки позиционирования или траектории движения. Блок оценивания осуществляет оценивание внешних не измеряемых сил и моментов. Блок обработки навигационных данных компенсирует навигационные данные от бортовой навигационной системы АНПА, локальной навигационной системы и глобальной системы навигации. Миссия ведущего АНПА задается оператором, а миссия ведомых АНПА корректируется в зависимости от поведения, ведущего АНПА.

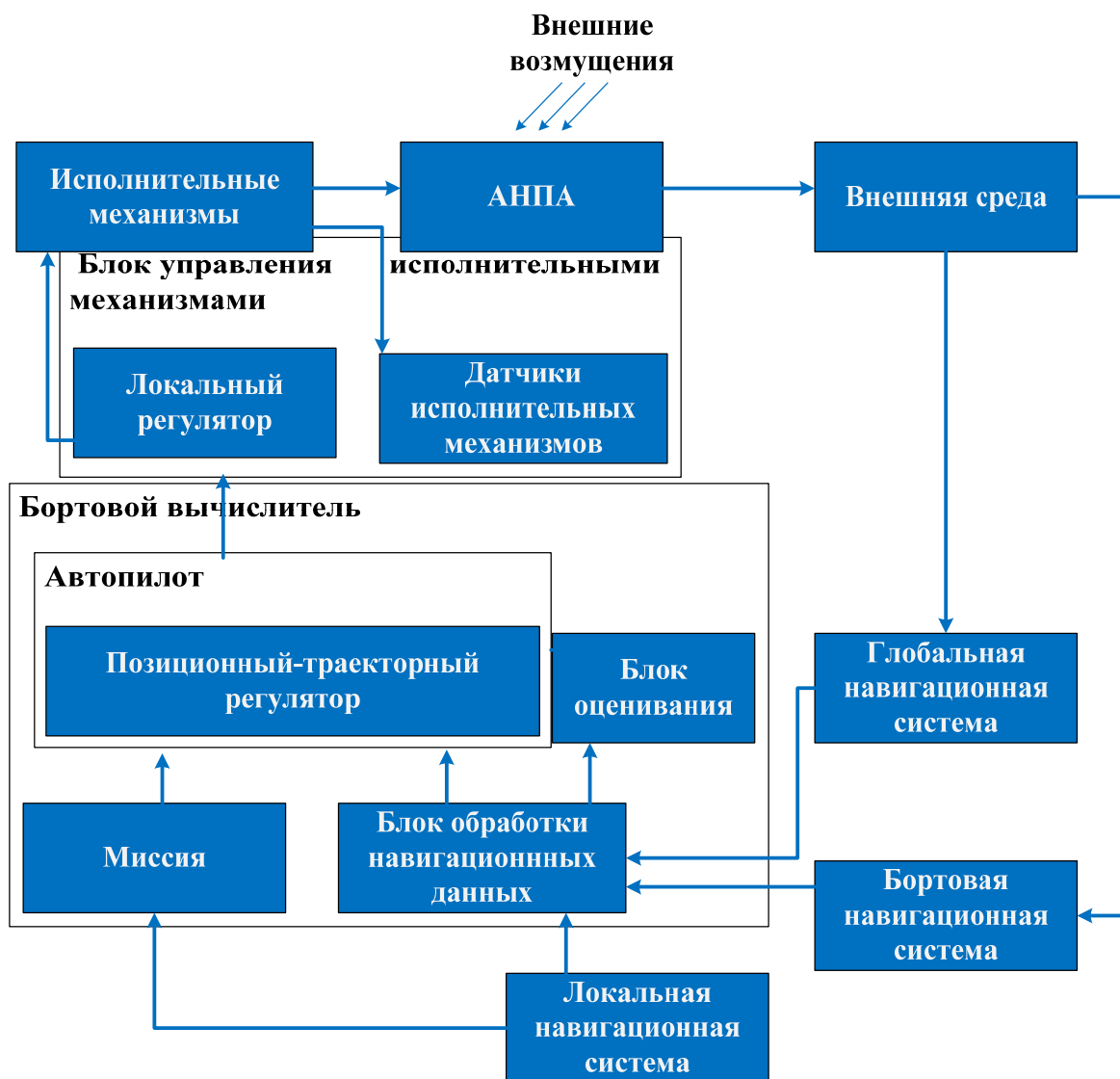


Рис. 7 – Структура системы управления АНПА

Заключение

В данной работе представлен алгоритм адаптивного управления АНПА, построенного на базе позиционно-траекторного метода с контуром слежения за выходами эталонной модели, и контуром оценивания внешних и параметрических воздействий на эталонную модель. АНПА функционирует в группе, состоящей из 5-ти подводных роботов. Движение ведущего АНПА используется как движение эталонного подвижного объекта, а параметры его состояния как параметры эталонной модели. Ведомые АНПА осуществляют слежение за эталонным движением. Предложенный алгоритм управления

АНПА позволяет обеспечивать высокую степень устойчивости системы не только по средствам регулирования нижнего уровня управления, но, так же, смягчить требования к самой эталонной модели, что, в свою очередь, позволит повысить эффективность прикладного использования алгоритма прямого адаптивного управления с эталонной моделью.

Приведенное в статье моделирование показывает работоспособность предложенного подхода. Отклонение параметров объекта управления от значений эталонной модели, при условии воздействия внешнего возмущения на объект, остается в пределах $0,1 - 0,2 \%$.

При этом уровень отклонения оцениваемых значений неизмеряемого воздействия от реальных значений в пределах 2% . Отклонение зависит от параметров быстрогодействия наблюдателя a_1 , и может быть уменьшено при наличии возможности повышения этого коэффициента.

Благодарности

Работа выполнена в Южном федеральном университете в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-3089.2017.8.

Литература

1. Landau I. D. et al. Adaptive control: algorithms, analysis and applications. – Springer Science & Business Media, 2011., 585 p.
 2. Franklin G. F., Powell J. D., Workman M. L. Digital control of dynamic systems (3rd Edition). – Menlo Park : Addison-wesley, 1998. – V. 3., 850 p.
 3. Kuo B. C. Automatic control systems. – Prentice Hall PTR, 1987., 659 p.
 4. Путов В.В. Прямые и не прямые беспойсковые адаптивные системы с мажорирующими функциями и их приложения к управлению многостепенными нелинейными упругими механическими объектами // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2007. – № 10. – С. 4–11.
-



5. Бойчук Л.М. Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. – М.: Энергия, 1971. , 112 с.
 6. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994., 344 с.
 7. Пшихопов В.Х., Федотов А.А., Медведев М.Ю., Медведева Т.Н., Гуренко Б.В. Позиционно-траекторная система прямого адаптивного управления морскими подвижными объектами // Инженерный вестник Дона, 2014. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2496
 8. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Гайдук А.Р., Шевченко В.А. Энергосберегающее управление электропоездом в условиях неоднородности профиля пути // Известия ЮФУ. Технические науки, 2013, № 3 (140), С. 162–168.
 9. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Децентрализованное управление группой однородных подвижных объектов в двумерной среде с препятствиями // Мехатроника, автоматизация, управление, 2016. – Т. 17. – № 5. – С. 346-353.
 10. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В. Алгоритмы адаптивных позиционно-траекторных систем управления подвижными объектами // Проблемы управления, 2015. – № 4. – С. 66-75.
 11. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Шевченко В.А. Адаптивное управление с эталонной моделью приводом постоянного тока // Известия ЮФУ. Технические науки, 2015. – № 2 (163). – С. 6–18.
 12. Медведев М.Ю., Пшихопов В.Х., Шевченко В.А. Базовые алгоритмы адаптивного управления синхронным генератором с эталонной моделью // Инженерный вестник Дона, 2015. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3321
-

13. Медведев М.Ю., Шевченко В.А. Оценка возмущений в процессе автоматического регулирования синхронного генератора // Инженерный вестник Дона, 2013. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1930

14. Пшихопов В.Х., Гуренко Б.В., Медведев М.Ю., Маевский А.М., Голосов С.П. Оценивание аддитивных возмущений АНПА робастным наблюдателем с нелинейными обратными связями // Известия ЮФУ. Технические науки, 2014. – № 3. – С. 128-137.

15. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Федоренко Р.В., Гуренко Б.В., Чуфистов В.М., Шевченко В.А. Алгоритмы многосвязного позиционно-траекторного управления подвижными объектами // Инженерный вестник Дона, 2014. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2579

16. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Крухмалев В.А. Базовые алгоритмы адаптивного позиционно-траекторного управления подвижными объектами при позиционировании в точке // Мехатроника, автоматизация, управление, 2015. – Т. 16. – № 4. – С. 219-225.

References

1. Landau I. D. et al. Adaptive control: algorithms, analysis and applications, Springer Science & Business Media, 2011., 585 p.
2. Franklin G. F., Powell J. D., Workman M. L. Digital control of dynamic systems. Menlo Park : Addison-wesley, 1998. Vol. 3, 850 p.
3. Kuo B. C. Automatic control systems, Prentice Hall PTR, 1987., 659 p.
4. Putov V.V. Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie, 2007, № 10, pp. 4–11.
5. Boychuk L.M. Metod strukturnogo sinteza nelineynykh sistem avtomaticheskogo upravleniya [Method of structure synthesis for automatic control systems]. Moscow: Energiya, 1971. 112 p.
6. Kolesnikov A.A. Sinergeticheskaya teoriya upravleniya [Synergetic control theory]. Moscow: Energoatomizdat, 1994. 344 p.



7. Pshikhopov V.Kh., Fedotov A.A., Medvedev M.Yu., Medvedeva T.N., Gurenko B.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2496
8. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gayduk A.R., Shevchenko V.A. Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki, 2013, №3 (140), pp. 162–168.
9. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie, 2016, Vol. 17, №5, pp. 346–353.
10. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gurenko B.V. Problemy upravleniya, 2015, №4, pp. 66–75.
11. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Shevchenko V.A. Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki, 2015, №2 (163), pp.6–18.
12. Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., Shevchenko V.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3321
13. Medvedev M.Yu., Shevchenko V.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1930
14. Pshikhopov V.Kh., Gurenko B.V., Medvedev M.Yu., Maevskiy A.M., Golosov S.P. Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki, 2014, № 3 (152), pp.128–137.
15. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Fedorenko R.V., Gurenko B.V., Chufistov V.M., Shevchenko V.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2579
16. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Krukhmalev V.A. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie, 2015, Vol. 16, No. 4, pp. 219–225.