УДК 681.513.66

АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНЫХ ПОЗИЦИОННО-ТРАЕКТОРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ[1]

В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, Б.В. Гуренко

Описаны алгоритмы адаптивных систем управления подвижными объектами. Рассмотрена задача позиционирования в точке в предположении параметрической неопределенности и действия на подвижный объект неизмеряемых возмущений. С помощью метода позиционно-траекторного управления синтезированы базовые алгоритмы вычисления управляющих сил и моментов. Предложены структура и алгоритмы адаптивной позиционно-траекторной системы с эталонной моделью. Показан синтез адаптивного регулятора и дан анализ устойчивости замкнутой системы. Приведен пример синтеза регулятора и представлены результаты моделирования для автономного необитаемого подводного аппарата.

Ключевые слова: позиционно-траекторное управление, адаптивное управление, подвижный объект, эталонная модель, автономный необитаемый подводный аппарат.

ВВЕДЕНИЕ

Для управления подвижными объектами успешно применяются системы позиционно-траекторного управления [1], которые вместе с алгоритмами робастного оценивания возмущений [2] позволяют синтезировать эффективные непрямые адаптивные системы для подвижных объектов морского базирования [3, 4] и воздухоплавательных комплексов [5—7]. Известно, что в системах непрямого адаптивного управления на качество замкнутой системы существенно влияют алгоритмы оценивания [8]. В этой связи перспективны методы прямого адаптивного управления с эталонными моделями [9, 10]. Однако метод позиционно-траекторного управления, представляющий собой развитие метода структурного синтеза [11], получившего известность как метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов [12], обладает особенностями, связанными с тем, что его параметрами служат параметры эталонного уравнения. Так, если эталонное уравнение замкнутой системы задано в виде

$$\ddot{\psi} + T_1\dot{\psi} + T_0\psi = 0, \tag{1}$$

где ψ — ошибка управления; T_1 и T_0 — постоянные параметры, то структура позиционно-траекторного регулятора при некоторых предположениях может быть представлена в виде

$$u = -K(x)(f_0(x) + T_1\dot{\psi} + T_0\psi), \tag{2}$$

где $K(x)$ и $f_0(x)$ — некоторые функции вектора переменных состояния x, зависящие от модели объекта.

Таким образом, параметрами управления (2) являются параметры эталонной модели (1). Поэтому изменение этих параметров с целью адаптации системы приводит к изменению параметров эталонной модели, что при фиксированном критерии качества недопустимо. В настоящей работе предлагается структура системы управления, предполагающая наличие дополнительных динамических звеньев с настраиваемыми параметрами. Это позволяет обеспечить беспоисковую адаптацию позиционно-траекторных систем управления без изменения эталонной модели.

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 14-19-01533.

Идея расширения пространства состояний для подавления возмущений известна давно [13]. С результатами в данной области можно ознакомиться в обзорах [9, 14], а также работах [15—17]. Адаптация позиционно-траекторных систем управления представлена в работах [18—22]. В работе [18] предложены адаптивные алгоритмы управления приводами, основанные на расширении моделей управляемых объектов уравнениями, генерирующими заданный класс возмущений. Для такой расширенной модели строится система управления [18], обеспечивающая устойчивость замкнутой системы. Данный метод развивается для подвижных объектов, описываемых уравнениями кинематики и динамики твердого тела в трехмерном пространстве [19]. Предложен адаптивный алгоритм позиционно-траекторного управления для уравнений динамики подводного аппарата, проведен анализ структуры и устойчивости замкнутой системы [20]. Анализ устойчивости показал [20], что замкнутая система управления является линейной, что позволяет выбрать матрицу коэффициентов настройки алгоритма адаптации. Недостаток алгоритмов, представленных в работе [20], заключается в том, что входной информацией для алгоритма адаптации служит текущее отклонение состояния системы от его значения в установившемся режиме. Иными словами, алгоритм адаптации не имеет информации о требованиях к переходному процессу, задаваемому эталонным уравнением. В частности, в работе [20] заданное эталонным уравнением быстродействие может быть обеспечено только при равенстве матрицы эталонного уравнения и матрицы настроек алгоритма адаптации. Так, эталонное характеристическое уравнение имеет вид [20],

$$s + T_1 = 0, \tag{3}$$

где T_1 — диагональная матрица постоянных коэффициентов.

Характеристическое уравнение замкнутой системы

$$s^2 + (A + T_1)s + T_1A = 0, \tag{4}$$

где A — диагональная матрица постоянных коэффициентов настройки алгоритма адаптации.

Из уравнений (3) и (4) следует, что повышение быстродействия алгоритма адаптации в работе [20] приводит к повышению быстродействия замкнутой системы, т. е. к отклонению от заданного эталонного уравнения (3).

В работах [21, 22] представлены алгоритмы непрямого адаптивного позиционно-траекторного управления с оцениванием возмущений.

1. ПОЗИЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР С ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЬЮ

В данной работе для устранения недостатков адаптивных позиционно-траекторных систем управления расширяются цепочками интеграторов [23] и к полученной системе применяется подход беспоисковых систем с эталонной моделью [24—26]. Рассматриваются как уравнения кинематики, так и уравнения динамики подвижного объекта. Такая постановка задачи обусловлена тем, что при решении задач позиционирования и движения в условиях препятствий часто предъявляют высокие требования к точности, например, при стыковке. В этой связи дополнительные погрешности, вносимые при решении прямой и обратной задачи кинематики, нежелательны.

Рассмотрим модель подвижного объекта на базе уравнений кинематики и динамики твердого тела [1]

$$\begin{aligned} \dot{y} &= R(y)x, \\ \dot{x} &= M^{-1}(F_u + F_d), \end{aligned} \tag{5}$$

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 (5) рассмотрим номинальную модель вида:

$$\begin{aligned} \dot{y}_m &= R(y_m)x_m, \\ \dot{x}_m &= M^{-1}(F_{um} + F_{dm}), \end{aligned} \tag{6}$$

где y_m — вектор линейных и угловых положений номинальной модели во внешней системе координат; x_m — вектор линейных и угловых скоростей номинальной модели в связанной системе координат; $R(y_m)$ — матрица кинематики номинальной модели; F_{um} — вектор управляющих сил и моментов номинальной модели; 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.

Синтезируем управление для номинальной модели (6). В соответствии с методом позиционно-траекторного управления [1] введем ошибку позиционирования номинальной модели в виде

$$\Psi_{эт} = A_1 y_m + A_2, \qquad (7)$$

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

Вычислим первую и вторую производные по времени от выражения (7) в силу уравнений номинальной модели (6):

$$\dot\Psi_{эт} = A_1 R(y_m) x_m, \qquad (8)$$

$$\ddot\Psi_{эт} = A_1 \dot R(y_m) x_m + A_1 R(y_m) M^{-1}(F_{um} + F_{dm}). \quad (9)$$

Потребуем, чтобы вектор (7) удовлетворял эталонному дифференциальному уравнению

$$\ddot\Psi_{эт} + T_2 \dot\Psi_{эт} + T_1 \Psi_{эт} = 0, \qquad (10)$$

где T_1 и T_2 — матрицы постоянных коэффициентов.

Подставим выражения (7)—(9) в уравнение (10) и решим его относительно вектора управляющих сил и моментов F_{um}:

$$F_{um} = -F_{dm} + (A_1 R(y_m) M^{-1})^{-1} \times \\ \times \{-A_1 \dot R(y_m) x_m - T_2 \dot\Psi_{эт} - T_1 \Psi_{эт}\}, \qquad (11)$$

Выражение (11) вместе с номинальной моделью (6) образуют эталонную модель подвижного объекта.

Ошибка позиционирования для подвижного объекта (5) задается в том же виде, что и для эталонной модели:

$$\Psi = A_1 y + A_2. \qquad (12)$$

Дополним модель подвижного объекта (5) цепочкой интеграторов:

$$\dot z_1 = z_2,\ \dot z_2 = z_3,\ ...,\ \dot z_n = \Psi - \Psi_{эт} = A_1 y - A_1 y_m. \quad (13)$$

Введем ошибку позиционного регулятора в виде

$$e = \Psi - \Psi_{эт} + B_1 z_1 + ... + B_n z_n = \\ = A_1 y - A_1 y_m + B_1 z_1 + ... + B_n z_n, \qquad (14)$$

где B_i — матрицы коэффициентов настройки регуляторов.

Потребуем, чтобы ошибка управления (14) удовлетворяла эталонному уравнению

$$\ddot e + T_2 \dot e + T_1 e = 0. \qquad (15)$$

Вычислим первую и вторую производные по времени от выражения (14) в силу уравнений (5), (6) и (13):

$$\dot e = A_1 R(y) x - A_1 R(y_m) x_m + B_1 z_2 + ... + B_{n-1} z_n + \\ + B_n(A_1 y - A_1 y_m), \qquad (16)$$

$$\ddot e = A_1(y) \dot R x + A_1 R(y) M^{-1}(F_u + F_d) - \\ - A_1 \dot R(y_m) x_m - A_1 R(y_m) M^{-1}(F_{um} + F_{dm}) + B_1 z_3 + ... \\ ... + B_{n-2} z_n + B_{n-1}(A_1 y - A_1 y_m) + \\ + B_n(A_1 R(y) x - A_1 R(y_m) x_m). \qquad (17)$$

Подставив выражения(14), (16) и (17) в уравнение (15), найдем вектор управляющих воздействий

$$F_u = -F_d + (A_1 R(y) M^{-1})^{-1}\{-A_1 \dot R(y) x - T_1 A_2 - \\ - B_1 z_3 - ... - B_{n-2} z_n - B_{n-1}(A_1 y - A_1 y_m) - \\ - B_n(A_1 R(y) x - A_1 R(y_m) x_m) - T_2(A_1 R(y) x + B_1 z_2 + ... \\ ... + B_{n-1} z_n + B_n(A_1 y - A_1 y_m)) - \\ - T_1(A_1 y + B_1 z_1 + ... + B_n z_n)\}. \qquad (18)$$

Структура замкнутой системы управления, представленная на рис. 1, соответствует структуре адаптивной беспоисковой позиционно-траекторной системы с явной эталонной моделью.

Уравнения (5)—(7), (11)—(13) и (18) образуют замкнутую систему, уравнения которой имеют вид:

$$\dot y = R(y) x,$$

$$\dot x = (A_1 R(y))^{-1}\{-A_1 \dot R(y) x) - T_1 A_2 - B_1 z_3 - ... \\ ... - B_{n-2} z_n - B_{n-1}(A_1 y - A_1 y_m) - B_n(A_1 R(y) x - \\ - A_1 R(y_m) x_m) - T_2(A_1 R(y) x + B_1 z_2 + ... + B_{n-1} z_n + \\ + B_n(A_1 y - A_1 y_m)) - T_1(A_1 y + B_1 z_1 + ... + B_n z_n)\},$$

$$\dot z_1 = z_2,\ ...,\ \dot z_n = A_1 y - A_1 y_m,$$

$$\dot y_m = R(y_m) x_m,$$

$$\dot x_m = (A_1 R(y_m))^{-1}\{-A_1 \dot R(y_m) x_m - T_2(A_1 R(y_m) x_m) - \\ - T_1(A_1 y_m + A_2)\}. \qquad (19)$$

Проведем анализ системы (19) в области малых отклонений, в которой матрицы кинематики $R(y) = R = \mathrm{const}$ и $R(y_m) = R_m = \mathrm{const}$. Дополнительно примем матрицы T_1 и T_2 диагональными, что допустимо при задании эталонных уравнений по различным каналам управления независимо друг от друга. Также примем, что матрица A_1 диа-

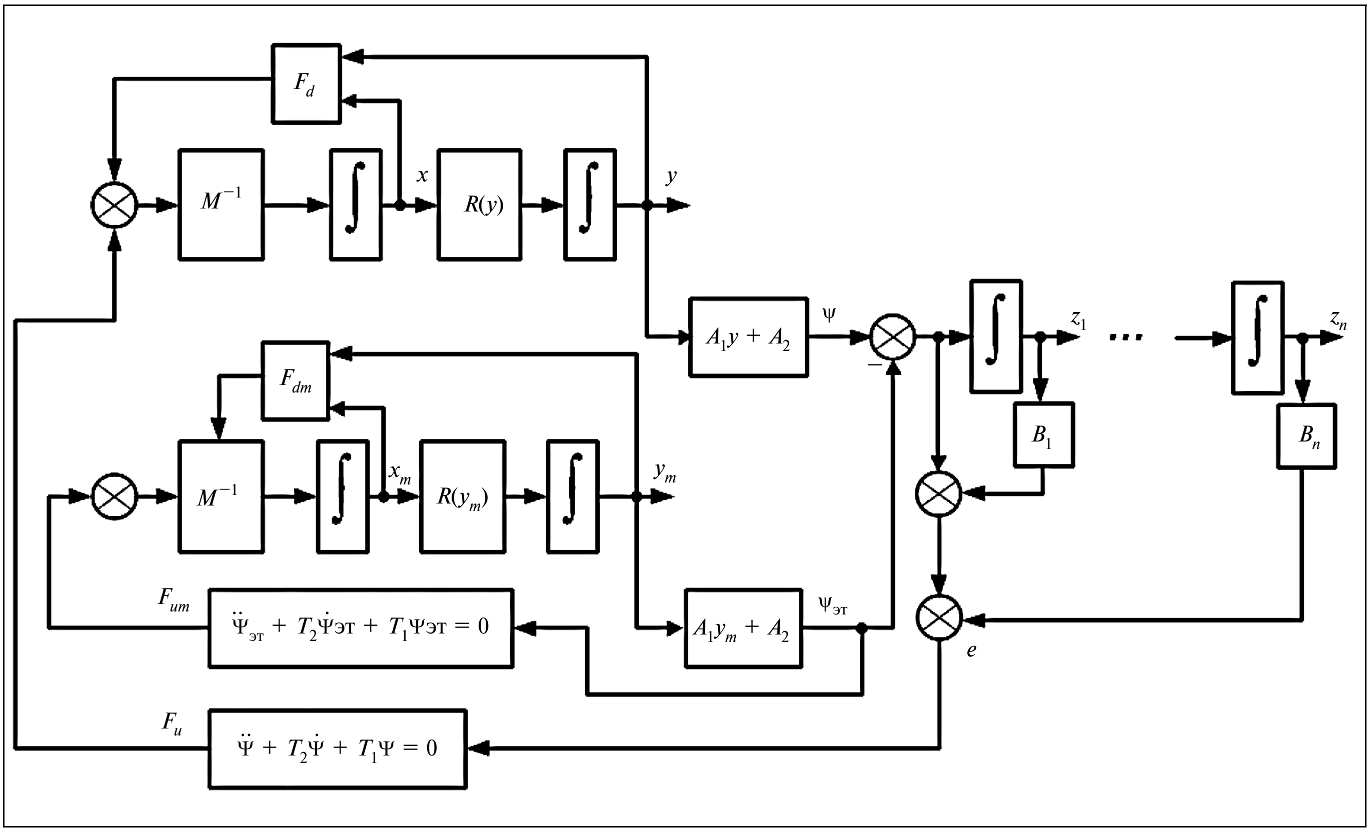

Рис. 1. Структура адаптивной позиционно-траекторной системы с явной эталонной моделью

гональная, а вектор $A_2 = 0$, что позволяет решать задачу позиционирования в нулевой точке.

При данных допущениях система (19) преобразуется к виду

$$\dot{y} = Rx,$$

$$\dot{x} = (A_1R)^{-1}\{-B_1z_3 - ... - B_{n-2}z_n - B_{n-1}(A_1y - A_1y_m) - B_n(A_1Rx - A_1R_mx_m) - T_2(A_1Rx + B_1z_2 + ... + B_{n-1}z_n + B_n(A_1y - A_1y_m)) - T_1(A_1y + B_1z_1 + ... + B_nz_n)\},$$

$$\dot{z}_1 = z_2, ..., \dot{z}_n = A_1y - A_1y_m,$$

$$\dot{y}_m = R_mx_m,$$

$$\dot{x}_m = (A_1R_m)^{-1}\{-T_2(A_1R_mx_m) - T_1A_1y_m\}. \quad (20)$$

Система (20) линейная, ее характеристический полином

$$D(s) = (s^2 + T_2s + T_1)(s^n + B_ns^{n-1} + ... + B_2s + B_1)(s^2 + T_2s + T_1). \quad (21)$$

Таким образом, полином (21) представляет собой полином контура базового закона управления, контура адаптации n-го порядка и контура эталонной модели. Иными словами, контур управления подвижным объектом является следящей за выходами эталонной модели системой. При этом цепочки интеграторов (13) обеспечивают в линейном приближении астатизм порядка $n - 1$. Постоянные матрицы коэффициентов B_i могут выбираться из условий устойчивости и быстродействия.

В некоторых случаях возможна автоматическая настройка матриц коэффициентов B_i на основе известных алгоритмов беспоисковых адаптивных систем с моделью [8, 24—26]. При $n = 2$ и $\dim x = \dim F_u$ можно воспользоваться утверждением 1 из работы [8, *с. 183*].

2. АЛГОРИТМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛ И МОМЕНТОВ МЕЖДУ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ

Распределение сил и моментов подвижного объекта относительно исполнительных механизмов осуществляется в два этапа [5, 6]. На первом

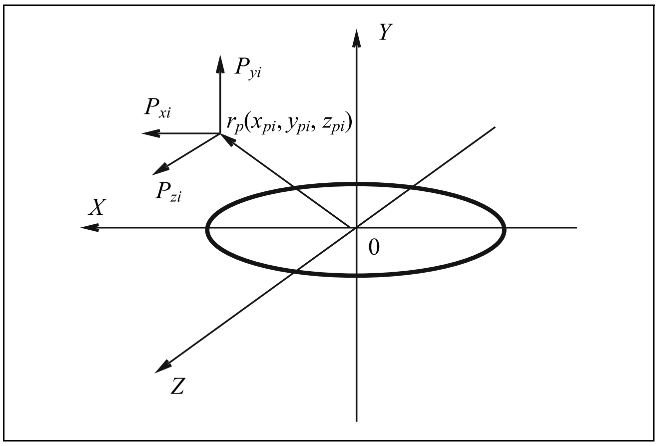

Рис. 2. Связь между управляющими силами и моментами и тягами исполнительных механизмов

этапе составляется система линейных уравнений вида:

$$F_u = M_{FP}P, \tag{22}$$

$$M_{FP} =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & ... & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & ... & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & ... & 0 & 0 & 1 \\ 0 & z_{p1} & -y_{p1} & 0 & z_{p2} & -y_{p2} & ... & 0 & z_{pm} & -y_{pm} \\ -z_{p1} & 0 & x_{p1} & -z_{p2} & 0 & x_{p2} & ... & -z_{pm} & 0 & x_{pm} \\ -y_{p1} & x_{p1} & 0 & -y_{p2} & x_{p2} & 0 & ... & -y_{pm} & x_{pm} & 0 \end{bmatrix}, \tag{23}$$

$$F_u = \begin{bmatrix} F_{ux} \\ F_{uy} \\ F_{uz} \\ N_{ux} \\ N_{uy} \\ N_{uz} \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} P_{x1} \\ P_{y1} \\ P_{z1} \\ ... \\ P_{xm} \\ P_{ym} \\ P_{zm} \end{bmatrix},$$

где m — число исполнительных механизмов, создающих проекции P_{xi}, P_{yi}, P_{zi} тяг на оси связанной системы координат; x_{pi}, y_{pi}, z_{pi} — координаты i-го исполнительно механизма; F_{ux}, F_{uy}, F_{uz}, N_{ux}, N_{uy}, N_{uz} — проекции управляющей силы и момента, действующего на подвижный объект.

Связь между управляющими силами и моментами и тягами исполнительных механизмов иллюстрируется на рис. 2. Положительные направления управляющих моментов соответствуют положительным углам Эйлера [27]. Предполагается, что исполнительные механизмы обеспечивают создание всех потребных сил и моментов. В противном случае применяются алгоритмы, обеспечивающие управление меньшим числом координат. Например, в работе [6] представлен алгоритм управления при нулевой проекции F_{uz}.

Таким образом, нахождение проекций тяг исполнительных механизмов по требуемым управляющим силам и моментам сводится к решению системы линейных уравнений (22) с неквадратной, в общем случае, матрицей (23).

Наилучшее в смысле среднеквадратичной ошибки решение системы (22), как известно [28], имеет вид

$$P = M_{FP}^{+} F_u, \tag{24}$$

где M_{FP}^{+} — псевдообратная матрица [28, *с. 32*].

На втором этапе вектор проекция тяг (24) преобразуется в управляемые переменные исполнительных механизмов. Указанное преобразование осуществляется в соответствии с выражениями:

$$P_i = \sqrt{P_{xi}^2 + P_{yi}^2 + P_{zi}^2}, \tag{25}$$

$$\alpha_i = \mathrm{arctg}(P_{yi}/P_{xi}), \tag{26}$$

$$\beta_i = \mathrm{arctg}(P_{zi}/P_{xi}), \tag{27}$$

где P_i — тяга i-го исполнительного механизма; α_i — угол поворота i-го исполнительного механизма в вертикальной плоскости связанной системы координат; β_i — угол поворота i-го исполнительного механизма в горизонтальной плоскости связанной системы координат.

В соответствии с выражениями (25)—(27) задаются воздействия для систем управления нижнего уровня.

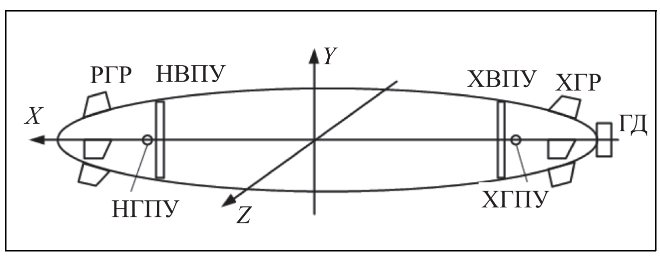

Рис. 3. Схема управляемого автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА): ГД — главный двигатель; НГР — носовые гидродинамические рули; ХГР — хвостовые гидродинамические рули; НВПУ — носовые вертикальные подруливающие устройства; НГПУ — носовые горизонтальные подруливающие устройства; ХВПУ — хвостовые вертикальные подруливающие устройства; ХГПУ — хвостовые горизонтальные подруливающие устройства

3. ПРИМЕР СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Рассмотрим подводный аппарат, представленный на рис. 3.

Матрицы кинематики и инерционных параметров

$$R = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A_\omega \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\vartheta & -\cos\psi\sin\vartheta\cos\gamma + \sin\psi\sin\gamma & \cos\psi\sin\vartheta\sin\gamma + \sin\psi\cos\gamma \\ \sin\vartheta & \cos\vartheta\cos\gamma & -\cos\vartheta\sin\gamma \\ -\sin\psi\cos\vartheta & \cos\psi\sin\gamma + \sin\psi\sin\vartheta\cos\gamma & \cos\psi\cos\gamma - \sin\psi\sin\vartheta\sin\gamma \end{bmatrix},$$

$$A_\omega = \begin{bmatrix} 0 & \dfrac{\cos\gamma}{\cos\vartheta} & -\dfrac{\sin\gamma}{\cos\vartheta} \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma \\ 1 & -\mathrm{tg}\,\vartheta\cos\gamma & \mathrm{tg}\,\vartheta\sin\gamma \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 20 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 16 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 16 \end{bmatrix}.$$

Вектор динамических сил и моментов определяется гидродинамическими составляющими:

$$F_d^0 = 0{,}5s\rho V^2 \begin{bmatrix} -c_x \\ c_y \\ c_z \\ m_x l \\ m_y l \\ m_z l \end{bmatrix},$$

где c_x, c_y, c_z, m_x, m_y, m_z — коэффициенты гиродинамических сил; $\rho = 1000$ кг/м^3 — плотность воды; V — линейная скорость АНПА, м/с; $s = 0{,}18$ м^2; $l = 3$ м; $c_x = 0{,}06 - 0{,}003V - 0{,}142\alpha - 0{,}05\beta$; $c_y = -0{,}0009 + 1{,}07\alpha + 0{,}31\alpha|\alpha| - 0{,}0077|\beta| - 0{,}398\beta^2$; $c_z = -1{,}207\beta - 0{,}563\beta|\beta|$; $m_x = 0{,}098\beta + 0{,}162\alpha\beta - 0{,}056\alpha\beta|\beta|$; $m_y = 0{,}071\beta + 0{,}042\beta|\beta|$; $m_z = 0{,}00058 + 0{,}031\alpha + 0{,}086\alpha|\alpha|$; ψ, ϑ, γ — углы Эйлера; α и β — углы атаки и скольжения.

При $n = 2$ вектор управляющих сил и моментов (18) принимает вид:

$$F_u = -F_d + (A_1R(y)M^{-1})^{-1}\{-A_2\dot{R}(y)x - T_1A_2 - B_1(A_1y - A_1y_m) - B_2(A_1R(y)x - A_1R(y_m)x_m) - \\ - T_2(A_1R(y)x + B_1z_2 + B_2(A_1y - A_1y_m)) - T_1(A_1y + B_1z_1 + B_2z_2)\}.$$

Собственная матрица замкнутой системы в данном случае имеет вид

$$A = \begin{bmatrix} 0 & R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -R^{-1}(B_1 + T_2B_2 + T_1) & -B_2 - T_2 & -(A_1R)^{-1}T_1B_1 & -(A_1R)^{-1}(T_2B_1 + T_1B_2) & R^{-1}(B_1 + T_2) & R^{-1}B_1R_m \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 \\ A_1 & 0 & 0 & 0 & -A_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_m \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -R_m^{-1}T_1 & -T_2 \end{bmatrix}.$$

Характеристический полином (21) приводится к виду

$$D(s) = (s^2 + T_2s + T_1)(s^n + B_ns + B_1)(s^2 + T_2s + T_1).$$

Характеристики главного двигателя: тяга $P_{\text{ГД}} = 0 \div 100$ Н; координаты приложения тяги $x_{\text{ГД}} = -1{,}5$ м, $y_{\text{ГД}} = 0$ м, $z_{\text{ГД}} = 0$ м.

Характеристики гидродинамических носовых и хвостовых рулей: площадь рулей $s_{\text{ХГР}} = s_{\text{НГР}} = 0{,}1$ м^2; координаты рулей $x_{\text{ХГР1}} = -1{,}2$ м, $y_{\text{ХГР1}} = 0{,}2$ м, $z_{\text{ХГР1}} = 0$ м, $x_{\text{ХГР2}} = -1{,}2$ м, $y_{\text{ХГР2}} = 0$ м, $z_{\text{ХГР2}} = 0{,}2$ м, $x_{\text{ХГР3}} = -1{,}2$ м, $y_{\text{ХГР3}} = -0{,}2$ м, $z_{\text{ХГР2}} = 0$ м, $x_{\text{ХГР4}} = -1{,}2$ м, $y_{\text{ХГР2}} = 0$ м, $z_{\text{ХГР2}} = -0{,}2$ м, $x_{\text{НГР1}} = -1{,}2$ м, $y_{\text{НГР1}} = 0{,}2$ м, $z_{\text{НГР1}} = 0$ м, $x_{\text{НГР2}} = -1{,}2$ м, $y_{\text{НГР2}} = 0$ м, $z_{\text{НГР2}} = 0{,}2$ м, $x_{\text{НГР3}} = 1{,}2$ м, $y_{\text{НГР3}} = -0{,}2$ м, $z_{\text{НГР2}} = 0$ м, $x_{\text{НГР4}} = 1{,}2$ м, $y_{\text{НГР2}} = 0$ м, $z_{\text{НГР2}} = -0{,}2$ м.

Характеристики подруливающих устройств: $P_{ХГПУ} = P_{ХВПУ} = P_{НГПУ} = P_{НВПУ} = -30 \div 30$ Н; $x_{ХГПУ} = -1{,}1$ м, $y_{ХГПУ} = 0$ м, $z_{ХГПУ} = 0$ м; $x_{ХВПУ} = -1{,}0$ м, $y_{ХВПУ} = 0$ м, $z_{ХВПУ} = 0$ м; $x_{НВПУ} = 1{,}0$ м, $y_{НВПУ} = 0$ м, $z_{НВПУ} = 0$ м; $x_{НГПУ} = 1{,}1$ м, $y_{НГПУ} = 0$ м, $z_{НГПУ} = 0$ м.

Матрица (23) принимает в данном случае вид

$$M_{FP} =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & z_{ХГР2} & z_{ХГР4} & 0 & 0 & z_{НГР2} & z_{НГР4} & y_{ХГР1} & y_{ХГР3} & 0 & 0 & y_{НГР1} & y_{НГР3} \\ 0 & 0 & z_{ХГР2} & 0 & z_{ХГР4} & 0 & z_{НГР2} & 0 & z_{НГР4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{НГР1} & x_{ХГР3} & x_{ХГПУ} & x_{НГПУ} & x_{НГР1} & x_{НГР3} \\ 0 & y_{ХГР1} & 0 & y_{ХГР3} & 0 & y_{НГР1} & 0 & y_{НГР3} & 0 & x_{ХГР2} & x_{ХГР4} & x_{ХВПУ} & x_{НВПУ} & x_{НГР2} & x_{ХГР4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Результаты моделирования замкнутой системы управления АНПА представлены на рис. 4 и 5. Параметры регулятора $T_1 = 0{,}25I$, $T_2 = I$, $A_1 = I$, $A_2 = -[10+t\ 10\ 10\ 0\ 0\ 0]^T$, $B_1 = 10I$, $B_2 = 25I$, где I — единичная матрица размерностью 6×6.

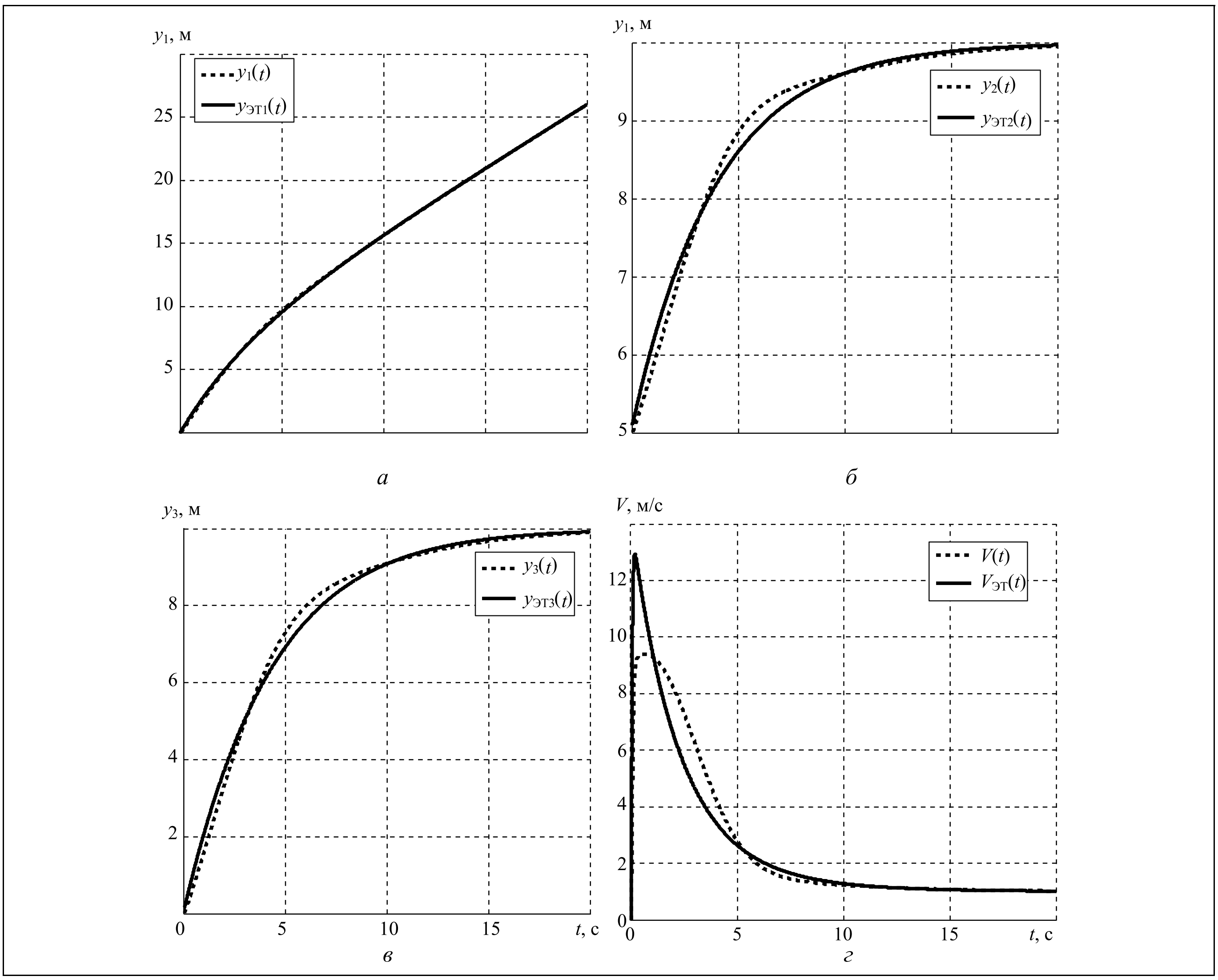

Рис. 4. Результаты моделирования системы с пропорционально-интегральной адаптацией: *а* — переменная y_1; *б* — переменная y_2; *в* — переменная y_3; *г* — квадрат скорости АНПА

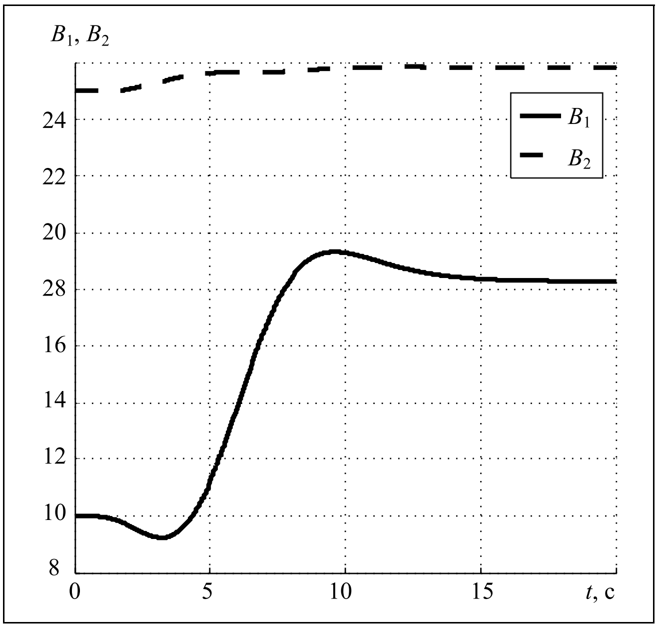

Рис. 5. Адаптация элементов матриц B_1 и B_2 по уравнениям (28)

Линейная зависимость матрицы A_2 от времени означает, что точка позиционирования перемещается с постоянной скоростью. В этой связи число интеграторов $n = 2$ обеспечивает точную отработку задания благодаря второму порядку астатизма.

Неизмеряемое параметрическое и внешнее возмущение

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

При указанных параметрах моделируется стыковка АНПА с подвижной базой в условиях возмущений и параметрической неопределенности.

Увеличение элементов матриц B_1 и B_2 позволяет уменьшить ошибку отработки эталонного сигнала. Для автоматической настройки матриц B_1 и B_2 применены алгоритмы, базирующиеся на известных результатах [8, 9]:

$$\dot{B}_1 = -\gamma_1 z_1^T A_1(y - y_m),$$

$$\dot{B}_{2\,2} = -\gamma_2 z_2^T A_1(Rx - R_m x_m). \qquad (28)$$

На рис. 5 показано изменение элементов матриц B_1 и B_2 во времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная процедура синтеза адаптивного управления позволяет синтезировать позиционно-траекторные алгоритмы управления подвижными объектами. Предполагается, что эталонное уравнение задается интеллектуальной системой верхнего уровня, формирующей критерий качества замкнутой системы. Основные преимущества предложенного метода заключаются в возможности его применения в нелинейных системах и возможности раздельной настройки контура эталонной модели, контура управления и контура адаптации. Это позволяет расширить полученные результаты на задачи движения вдоль заданных траекторий. Перечислим ограничения метода. Базовый контур управления линеаризует объект обратной связью, что может приводить к особенностям в алгоритмах управления. Далее, при переменных матрицах B_i возникает проблема обеспечения устойчивости процесса адаптации. Отметим, что алгоритм распределения управляющих сил и моментов по исполнительным механизмам не учитывает ограничений на их тяги. Кроме того, предполагается, что быстродействие исполнительных механизмов существенно выше быстродействия замкнутой системы, что в современных подвижных объектах не всегда допустимо.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю.* Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. — М.: Наука, 2011. — 350 с.
2. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю.* Алгоритмы оценивания в системе управления автономного роботизированного дирижабля // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2013. — № 2 (139). — С. 200—207.
3. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Y., and Gurenko B.V.* Homing and Docking Autopilot Design for Autonomous Underwater Vehicle // Applied Mechanics and Materials Vols. 490—491 (2014). — P. 700—707. Trans Tech Publications, Switzerland. — URL: http://rirpc.ru/wp-content/uploads/2015/03/AMM.490-491.700.pdf (дата обращения: 28.05.2015).
4. *Оценивание* аддитивных возмущений АНПА робастным наблюдателем с нелинейными обратными связями / В.Х. Пшихопов, Б.В. Гуренко, М.Ю. Медведев и др. // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2014. — № 3 (152). — С. 128—137.
5. *Система* позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: математическая модель / В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, А.Р. Гайдук и др. // Мехатроника, автоматизация и управление. — 2013. — № 6. — С. 14—21.
6. *Система* позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: алгоритмы управления / В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, А.Р. Гайдук и др. // Там же. — № 7. — С. 13—20.
7. *Пшихопов В.Х.* Дирижабли: перспективы использования в робототехнике // Там же. — 2004. — № 5. — С. 15—20.
8. *Александров А.Г.* Оптимальные и адаптивные системы: Учеб. пособие. — М.: Высшая школа, 1989. — 263 с.
9. *Земляков С.Д., Рутковский В.Ю.* О некоторых результатах развития теории и практики применения беспоисковых адаптивных систем // Автоматика и телемеханика. — 2001. — № 7. — С. 103—121.

10. *Путов В.В.* Прямые и непрямые беспоисковые адаптивные системы с мажорирующими функциями и их приложения к управлению многостепенными нелинейными упругими механическими объектами // Мехатроника, автоматизация и управление. — 2007. — № 10. — С. 4—11.
11. *Бойчук Л.М.* Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. — М.: Энергия, 1971.
12. *Колесников А.А.* Синергетическая теория управления. — М.: Энергоатомиздат, 1994.
13. *Бессекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического управления. — СПб., 2003.
14. *Дружинина М.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л.* Методы адаптивного управления нелинейными объектами по выходу // Автоматика и телемеханика. — 1996. — № 2. — С. 2—33.
15. *Никифоров В.О.* Наблюдатели внешних детерминированных возмущений. I. Объекты с известными параметрами // Автоматика и телемеханика. — 2004. — № 10. — С. 13—24.
16. *Никифоров В.О.* Наблюдатели внешних детерминированных возмущений II. Объекты с неизвестными параметрами // Там же. — № 11. — С. 40—48.
17. *Фуртат И.Б., Цыкунов А.М.* Алгоритм адаптивного управления по выходу на основе модифицированной параметризации уравнений объекта // Мехатроника, автоматизация и управление. — 2006. — № 8. — С. 2—7.
18. *Медведев М.Ю.* Алгоритмы адаптивного управления исполнительными приводами. // Там же. — № 6. — С. 17—22.
19. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю.* Синтез адаптивных систем управления летательными аппаратами // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. — № 3 (104). — С. 187—196.
20. *Позиционно-траекторная* система прямого адаптивного управления морскими подвижными объектами / В.Х. Пшихопов, А.А. Федотов, М.Ю. Медведев и др. // Инженерный вестник Дона. — 2014. — № 3.
21. *Оценивание* аддитивных возмущений АНПА робастным наблюдателем с нелинейными обратными связями / В.Х. Пшихопов, Б.В. Гуренко, М.Ю. Медведев и др. // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2014. — № 3 (152). — С. 128—137.
22. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю.* Алгоритмы оценивания в системе управления автономного роботизированного дирижабля // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2013. — № 2 (139). — С. 200—207.
23. *Красовский А.А.* Алгоритмические основы оптимальных адаптивных регуляторов нового класса // Автоматика и телемеханика. — 1995. — № 9. — С. 104—116.
24. *Рутковский В.Ю., Глумов В.М., Суханов В.М.* Физически реализуемый алгоритм адаптивного управления с эталонной моделью // Автоматика и телемеханика. — 2011. — № 8. — С. 96—108.
25. *Земляков С.Д., Рутковский В.Ю.* Алгоритм функционирования адаптивной системы с эталонной моделью, гарантирующий заданную динамическую точность управления нестационарным динамическим объектом в условиях неопределенности // Автоматика и телемеханика. — 2009. — № 10. — С. 35—44.
26. *Глумов В.М., Земляков С.Д., Рутковский В.Ю., Суханов В.М.* Применение принципа построения адаптивных систем с эталонной моделью к задачам мониторинга текущего состояния трансмиссионных валов // Автоматика и телемеханика. — 2003. — № 5. — С. 131—146.
27. *Бюшгенс Г.С., Студнев Р.В.* Динамика самолета. Пространственное движение. — М.: Машиностроение, 1983.
28. *Гантмахер Ф.Р.* Теория матриц: 5-е изд. — М.: Физматлит, 2004. — 560 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии С.А. Красновой.

Пшихопов Вячеслав Хасанович — д-р техн. наук,
зав. кафедрой, ✉ pshichop@rambler.ru,

Медведев Михаил Юрьевич — д-р техн. наук, профессор,
✉ medvmihal@gmail.com,

Гуренко Борис Викторович — ассистент,
✉ boris.gurenko@gmail.com,

Технологический институт Южного федерального университета,
г. Таганрог.

8-я ВСЕРОССИЙСКАЯ МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ (МКПУ—2015),

28 сентября — 3 октября 2015 г.,

с. Дивноморское, г. Геленджик

Мультиконференция включает в себя три локальные научно-технические конференции.

Управление в интеллектуальных, эргатических и организационных системах (УИнтЭргОС—2015),
председатель — академик С.Н. Васильев

Направления работы

1. Интеллектуальные системы

- Автоматизация рассуждений и планирования действий
- Машинное обучение и методы дооснащения в условиях неопределенности
- Интеллектуальный анализ данных, распознавание и классификация
- Компьютерная лингвистика, онтологии, семантический поиск и управление знаниями
- Когнитивное моделирование и автоматизация целеполагания
- Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций
- Мультиагентные системы и распределенный искусственный интеллект
- Методы и технологии «мягких вычислений»
- Обучающие и экспертные системы. Верификация знаний
- Прикладные интеллектуальные системы управления и принятия решений

2. Эргатические информационно-управляющие системы

- Проблемы автоматизации эргатических систем
- Интеллектуализация процессов управления и обработки информации в эргатических системах
- Проблемы человеко-машинного интерфейса
- Обучающие и тренажерные комплексы эргатических систем управления подвижными объектами
- Опыт создания и внедрения эргатических систем

3. Организационные системы

- Управление в активных системах
- Оптимизационные и теоретико-игровые модели и методы управления в организационных системах
- Информационные технологии в организационном управлении
- Модели принятия решений в организационных системах
- Информационное управление. Модели социальных сетей
- Системы управления проектами и программами

Робототехника и мехатроника (РиМ—2015),
председатель — академик Ф.Л. Черноусько

Направления работы

- Кинематика и динамика роботов и мехатронных систем
- Средства очувствления и навигации роботов и мехатронных систем
- Алгоритмы и системы управления роботов и мехатронных систем
- Планирование поведения роботов в недетерминированных средах
- Групповое взаимодействие роботов
- Биоподобные роботы и экзоскелеты
- Медицинские роботы
- Беспилотные летательные аппараты
- Безэкипажные наземные машины
- Морские роботы
- Роботы для ликвидации чрезвычайных ситуаций
- Прикладные аспекты проектирования и применение роботов и мехатронных систем различного назначения

Управление в распределенных и сетевых системах (УРиСС—2015),
председатель — чл.-корр. РАН И.А. Каляев

Направления работы

- Модели и стратегии сетевого управления
- Управление в сетецентрических системах
- Самоорганизующиеся распределенные системы
- Управление в облачных средах
- Мультиагентное взаимодействие в сетях
- Программно конфигурируемые сети
- Методы реконфигурации в сетевых управляющих системах
- Сетевое управление мобильными объектами и устройствами
- Сетевое управление объектами социальной инфраструктуры («умный город» и «умный дом»)
- Прикладные задачи управления в сетях

Подробная информация на сайте http://www.conf.mvs.sfedu.ru