

## МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ САМОЛЕТНОГО ТИПА

### Т. 3. Муслимов

**Аннотация.** Представлены результаты исследования процесса управления строем автономных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) самолетного типа с целью повышения эффективности управления формированием и поддержанием строя за счет разработки методов и алгоритмов децентрализованного управления, учитывающих нелинейный характер структуры систем «автопилот – аппарат». Для достижения данной цели поставлены и решены следующие задачи: 1. Анализ возможных подходов к решению задачи группового управления и выбор среди них тех, на основе которых возможна разработка децентрализованного группового управления БПЛА. 2. Синтез автопилота одиночного автономного БПЛА, отвечающего требованиям алгоритма группового управления. 3. Разработка методов и алгоритмов группового управления БПЛА с учетом особенностей динамики реальных систем «автопилот – БПЛА». 4. Модификация полученных методов и алгоритмов с целью обеспечения адаптивного управления в случае неопределенной или меняющейся динамики системы «автопилот - БПЛА». 5. Разработка математической модели в среде MATLAB/Simulink, позволяющей провести моделирование управления группами БПЛА и выполнение вычислительных экспериментов с целью оценки эффективности разработанных алгоритмов. Методологическую основу работы составили методы линейной алгебры, теории группового управления, метод функций Ляпунова, методы теории нечеткой логики, теории нелинейного управления, теории адаптивного управления, компьютерного моделирования.

**Ключевые слова:** стайное управление; управление роем; групповая робототехника.

### ВВЕДЕНИЕ

Переход к автономным роботам является одним из наиболее перспективных направлений в различных областях технологий, таких как цифровое производство [1], агропромышленный комплекс, обследование объектов инфраструктуры и др. Сложность реализации систем управления для таких роботов существенно зависит от специфики их конструкции [2]. При этом хотя вопросы автономного движения наземных мобильных роботов изучены достаточно детально [3, 4], повышение автономности беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) требует дополнительных исследований вследствие особенностей их динамики и необходимости обеспечения безопасности полетов [5, 6].

Значительный объем исследований в последние годы проводится в направлении разработки методов и алгоритмов управления координированным движением и взаимодействием различных типов автономных роботов, при этом проблема управления строем (формацией – англ. formation) роботов в реальных условиях по-прежнему остается актуальной. В особенности это относится к проблемам управления БПЛА самолетного типа по причине неизбежной сложности управления вследствие высокой динамики событий, ограничений на входные сигналы управления в реальных системах «автопилот – БПЛА», а также неголономности данных систем. Задачи кооперативного (группового) управления рассматривались в работах отечественных (В. А. Боднер, В. Г. Тарасов, В. Е. Павловский, И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян, В. Х. Пшихопов, М. Ю. Медведев и др.) и зарубежных (Т. W. McLain, R. W. Beard, W. Ren, R. Olfati-Saber, Н. Yamaguchi и др.) исследователей.

Согласно общепринятому определению под управлением строем/формацией (англ. formation control) подразумевается получение заданной заранее геометрической формы группой

автономных роботов. В процессе дальнейшего выполнения миссии группа должна поддерживать эту форму, таким образом действуя как твердое тело. Формации БПЛА находят свое применение в большом количестве практических задач. По этой причине проблемы управления строем/формацией БПЛА получают в последнее время большое внимание исследователей всего мира.

Скорость полета БПЛА самолетного типа не должна быть меньше определенного порогового значения, кроме того БПЛА этого типа не обладают такой высокой маневренностью, как квадрокоптеры и автономные вертолеты. Тем не менее для выполнения многих задач, в которых приоритетом является продолжительность полета, именно БПЛА самолетного типа подходят лучше всего.

В связи с развитием технологий становится очевидным, что большие группы БПЛА, обладающие автономностью и способные коммуницировать между собой, изучать окружающую обстановку сенсорами и обрабатывать информацию на борту с помощью собственных вычислительных мощностей, требуют децентрализованных подходов к их управлению. Именно децентрализованное управление обеспечивает возможность масштабирования и исключает уязвимость централизованных агентов, несущих на себе все обязанности по управлению. В литературе полностью децентрализованная группа взаимодействующих автономных роботов, особенностью которой является самостоятельное принятие решений о своем поведении каждого отдельного агента, обычно называется роем (англ. swarm).

Задача флорирования (для стайного поведения птиц и рыб также употребляется термин «мурмурация») строя (англ. flocking) в литературе общепринято понимается как децентрализованное формирование и поддержание группой автономных роботов (в том числе и БПЛА) заданной геометрической формы с целью выполнения некоторой сложной кооперативной задачи. Одним из методов, который может применяться для выполнения задачи флорирования БПЛА, является метод векторных полей следования пути (англ. path following vector fields). Для многих работ в данной области характерно использование при теоретических исследованиях упрощенных моделей БПЛА без учета высокоуровневой нелинейной динамики самого БПЛА и динамики автопилота. В целом задача флорирования может рассматриваться как совмещенная стратегия следования пути и децентрализованного управления строем БПЛА, то есть согласованное следование пути (англ. coordinated path following). Именно в такой постановке она исследуется в диссертационной работе [7], краткий обзор которой представлен в данной статье.

Таким образом, с учетом вышесказанного, проблема группового управления БПЛА, исследуемая в работе, является актуальной.

#### **СТЕПЕНЬ НАУЧНОЙ РАЗРАБОТАННОСТИ ТЕМЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕШАЕМОЙ ЗАДАЧИ**

Задачи управления БПЛА при их групповом применении рассматривались в некоторых монографиях. Существуют несколько подходов к решению проблемы формирования и поддержания строя БПЛА. В некоторых работах алгоритмы управления были разработаны для автономных квадрокоптеров и вертолетов. Для БПЛА самолетного типа наиболее распространенными являются следующие подходы: «ведущий – ведомые» и подход на основе виртуальных структур. В качестве недостатков метода «ведущий – ведомые» можно назвать отсутствие обратной связи от ведомых аппаратов, а также централизованность системы, заключающуюся в том, что выход из строя ведущего БПЛА ведет к потере формы. Подход на основе виртуальных структур в первоначальном варианте не предполагает обратную связь от объектов управления и, кроме того, в значительной степени чувствителен к внешним возмущениям (например, ветровым), вследствие чего теряется точность выдерживания строя. Существуют работы, в которых предлагается подход на основе применения методов теории оптимального управления, однако он обладает относительно высокой вычислительной сложностью и поэтому может

не подойти для использования на малых БПЛА. В некоторых статьях изучается управление большой плотной группой БПЛА как системой с распределенными параметрами.

Объектом данного исследования является процесс управления строем автономных БПЛА самолетного типа. Предмет исследования – методы и алгоритмы группового управления БПЛА. Целью исследования является повышение эффективности управления формированием и поддержанием строя автономных БПЛА самолетного типа за счет разработки методов и алгоритмов децентрализованного управления, учитывающих нелинейный характер структуры систем «автопилот – аппарат». Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ возможных подходов к решению задачи группового управления и выбор среди них тех, на основе которых возможна разработка децентрализованного группового управления БПЛА.

2. Синтез автопилота одиночного автономного БПЛА, отвечающего требованиям алгоритма группового управления.

3. Разработка методов и алгоритмов группового управления БПЛА с учетом особенностей динамики реальных систем «автопилот – БПЛА».

4. Модификация полученных методов и алгоритмов для обеспечения адаптивного управления в случае неопределенной или меняющейся динамики системы «автопилот – БПЛА».

Разработка математической модели в среде MATLAB/Simulink, позволяющей провести моделирование управления группами БПЛА и выполнение вычислительных экспериментов с целью оценки эффективности разработанных алгоритмов.

Методологическую основу работы составили методы линейной алгебры, теории группового управления, метод функций Ляпунова, методы теории нечеткой логики, теории нелинейного управления, теории адаптивного управления, компьютерного моделирования.

Проведен краткий обзор архитектур взаимодействия автономных роботов, показана актуальность применения БПЛА в решении задач разного рода, приведена краткая современная классификация БПЛА, а также подробно описаны примеры миссий, необходимым условием выполнения которых является решение задачи формирования и поддержания строя в полете.

Проанализированы основные существующие в литературе подходы к задаче управления строем автономных роботов и БПЛА, приведены их главные достоинства и недостатки. Сформулирована постановка задачи данного исследования, заключающаяся в совмещении использования стратегий следования пути и децентрализованного консенсуса на основе неоднородного векторного поля, причем для обеспечения сходимости движения БПЛА к задаваемому векторному полю необходимо повышение порядка системы и использование методов нелинейного управления.

Хотя сам строй БПЛА может иметь трехмерную геометрическую форму, для краткости рассматривается задание формы в проекции на горизонтальную плоскость в инерциальной системе координат (ИСК) с учетом выдерживания каждым БПЛА своей высоты полета. Формация (строй) БПЛА самолетного типа исследуется как многоагентная система, состоящая из  $N$  автономных агентов, где  $N \geq 2$ . Изначально аппараты могут находиться на любом расстоянии от финального пути, при этом архитектуру их взаимодействия можно представить как сильно связный граф

$$\mathcal{G} \triangleq (\mathcal{Q}, \mathcal{E}), \quad (1)$$

где множеством вершин графа  $\eta_i \in \mathcal{Q}$  является  $i$ -й агент-БПЛА, а каждая дуга в множестве  $\mathcal{E}$ , ведущая из вершины  $\eta_i$  в вершину  $\eta_j$ , означает, что агент  $\eta_i$  получает данные об относительном положении агента  $\eta_j$ .

Следовательно, множество дуг  $\mathcal{E}$  показывает заданные правила взаимодействия между агентами-БПЛА:

$$\mathcal{E} = \{(1,2), (2,1), (2,3), \dots, (N-1, N), (N, N-1)\}.$$

Таким образом, архитектура взаимодействия между БПЛА в группе представляет собой «открытую цепь».

### ЗАДАЧА ФОРМИРОВАНИЯ И ПОДДЕРЖАНИЯ СТРОЯ БПЛА

Рассматривается задача формирования и поддержания строя БПЛА самолетного типа в рамках сбора группы согласно общему курсовому углу [8], а также в случае заданного в пространстве прямолинейного пути [9, 10].

Проанализирована линейная архитектура децентрализованного консенсуса, представленного в работах [11–13], где на основе взаимодействия «сосед-с-соседом» получена обратная модель движения группы автономных роботов в виде линейных агентов, задающая желаемую геометрическую форму через заранее выбранные относительные расстояния. Показано, что данный метод может быть применен для более сложных объектов управления, таких как автономные БПЛА [14].

Хотя численное испытание предложенного подхода в среде MATLAB/Simulink проводится на нелинейных моделях БПЛА с полной динамикой, если аппарат оснащен настроенным автопилотом, то для синтеза законов управления на уровне наведения с помощью прямого метода Ляпунова модель системы «автопилот – БПЛА» может быть приближенно представлена кинематической моделью уницикла:

$$\dot{x} = v^c \sin \chi^c, \quad \dot{y} = v^c \cos \chi^c, \quad (2)$$

где  $x$  – значение координаты БПЛА вдоль оси, указывающей на восток в инерциальной системе координат (ИСК);  $y$  – значение координаты БПЛА вдоль оси, указывающей на север в ИСК;  $\chi^c$  – задаваемый курсовой угол;  $v^c$  – входной сигнал контура выдерживания путевой скорости (в предположении отсутствия ветра).

Динамика БПЛА в случае практической реализации при этом предполагает следующие ограничения на входные сигналы управления (ограничения Дубинса):

$$U \triangleq \{v^c, \dot{\chi}^c | 0 < v_{\min} \leq v^c \leq v_{\max}, -\dot{\chi}_{\max} \leq \dot{\chi}^c \leq \dot{\chi}_{\max}\}. \quad (3)$$

Далее используется модель динамики системы «автопилот – БПЛА» более высокого порядка по сравнению с моделью (2):

$$\dot{x} = v^g \sin \chi, \quad \dot{y} = v^g \cos \chi, \quad \dot{\chi} = \left(\frac{1}{\alpha^x}\right) (\chi^c - \chi), \quad \dot{v}^g = \left(\frac{1}{\alpha^v}\right) (v^c - v^g), \quad (4)$$

где  $v^g$  – путевая скорость БПЛА;  $\chi$  – текущий курсовой угол;  $\alpha^v$  – положительная константа контура выдерживания скорости, зависящая от реализации автопилота и аппаратных характеристик БПЛА;  $\alpha^x$  – аналогичная положительная константа контура выдерживания курса. Заметим, что согласно допущению об отсутствии ветровых возмущений, воздушная скорость равна путевой скорости.

Вводится в рассмотрение следующий вектор управляющих воздействий  $e^l$ , определяемый через выбор элементов вектора всех возможных ошибок относительных положений:

$$e^l = e^{line} \otimes [1 \quad 0]^T + e^n \otimes [0 \quad 1]^T \in \mathbb{R}^{2N \times 1},$$

где  $\otimes$  – произведение Кронекера;  $e^{line} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$  – подвектор управления в направлении оси ИСК, указывающей на восток, причем  $\mathbb{R}^{N \times 1}$  – пространство матриц размера  $N \times 1$  с компонентами из  $\mathbb{R}$ ;  $e^n \in \mathbb{R}^{2N \times 1}$  – подвектор управления в направлении оси ИСК, указывающей на север.

Далее используется для модификации децентрализованная архитектура консенсуса, представленная в работах [11–13]. Выбирается метод вычисления вектора управляющих воздействий  $e^l$  следующим образом [9, 10]:

$$e^l \triangleq (x - e_d^{line}) \otimes [1 \quad 0]^T + \left(M \otimes \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} P + D^l\right), \quad (5)$$

где  $\mathbf{e}_d^{\text{line}} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$  – вектор желаемых расстояний до линии пути;  $\mathbf{x} = (x_i)_{i=\overline{1,N}} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$  – вектор текущих координат аппаратов вдоль оси ИСК, указывающей на восток;

$$\mathbf{D}^l \triangleq - \left( \mathbf{M} \mathbf{H}^{-1} \otimes \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right) (\mathbf{P}_d^T, \hat{\mathbf{P}} \otimes \mathbf{1}_2^T)^T —$$

вектор управления системой в пространстве относительных состояний (пространство размерности  $2(N-1)$ , порождаемое столбцами матрицы инцидентности графа  $\mathcal{G}(1)$ ),  $\mathbf{1}_2 = [1 \ 1]^T$ ;  $\mathbf{H}$  – матрица, назначающая, между какими агентами будут задаваться относительные расстояния, определяемая следующим образом:

$$\mathbf{H} = [\mathbf{q}_1 \ \mathbf{q}_2 \ \dots \ \mathbf{q}_N]^T, \quad \mathbf{q}_i = [\dots \ 1 \ \dots \ -1 \ \dots], \quad i < N, \quad \mathbf{q}_N = [1 \ 1 \ \dots \ 1],$$

при этом  $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ ,  $\mathbf{q}_i \in \mathbb{R}^{1 \times N}$ , положение «1» и «-1» в  $\mathbf{q}_i$  назначается в соответствии со структурой графа  $\mathcal{G}(1)$ ;

$\mathbf{P}_d = \mathbf{P}_d^e \otimes [1 \ 0]^T + \mathbf{P}_d^n \otimes [0 \ 1]^T = ((p_{di}^e \ p_{di}^n)^T)_{i=\overline{1,N-1}} \in \mathbb{R}^{2(N-1) \times 1}$  – вектор желаемых относительных расстояний между БПЛА в строю;

$\mathbf{P} = \mathbf{P}_e \otimes [1 \ 0]^T + \mathbf{P}_n \otimes [0 \ 1]^T \in \mathbb{R}^{2N \times 1}$  – вектор текущих координат БПЛА в ИСК;

$\hat{\mathbf{P}} = \sum_{k=1}^N (p_k^e + p_k^n)$  – сумма текущих относительных расстояний;

$\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{N \times N}$  – матрица взаимодействия, которая в случае децентрализованного взаимодействия «сосед-с-соседом» имеет вид

$$\mathbf{M} \triangleq \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & -2 & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & 1 & 0 \\ \vdots & \ddots & 1 & -2 & 1 \\ 0 & \dots & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Вектор  $\hat{\mathbf{e}}^l$  текущих ошибок относительного положения для непосредственно взаимодействующих  $i$ -го и  $(i+1)$ -го агентов определяется через подвекторы  $\mathbf{e}^{\text{line}} = (e_i^{\text{line}})_{i=\overline{1,N}} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$  расстояний от аппаратов до линии пути вдоль восточной оси ИСК и  $\hat{\mathbf{e}}^n$  вдоль северной оси между аппаратами соответственно:

$$\hat{\mathbf{e}}^l = \mathcal{H}(\mathbf{e}^{\text{line}} \otimes [1 \ 0]^T + [\hat{\mathbf{e}}^n \ 0]^T \otimes [0 \ 1]^T) \in \mathbb{R}^{(2N-1) \times 1}, \quad (6)$$

где матрица  $\mathcal{H} \in \mathbb{R}^{(2N-1) \times 2N}$  задается как

$$\mathcal{H} \triangleq [\mathbf{I}_{2N-1} \ \mathbf{0}_{2N-1}], \quad (7)$$

и  $\mathbf{I}_{2N-1}$  – единичная матрица  $(2N-1)$ -го порядка, а нулевой вектор  $\mathbf{0}_{2N-1}$  находится как  $\mathbf{0}_{2N-1} = [0 \ \dots \ 0]^T \in \mathbb{R}^{(2N-1) \times 1}$ .

Далее определяется вектор  $\tilde{\mathbf{e}}^l \in \mathbb{R}^{2N \times 1}$ , получаемый с помощью матрицы поворота

$$\mathbf{M}_{\chi_q} \triangleq \begin{bmatrix} -\sin \chi^q & \cos \chi^q \\ \cos \chi^q & \sin \chi^q \end{bmatrix},$$

составленной с учетом конечного курсового угла полета строя  $\chi^q$ , единичной матрицы  $N$ -го порядка  $\mathbf{I}_N$  и (5):

$$\tilde{\mathbf{e}}^l \triangleq (\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{M}_{\chi_q}) \mathbf{e}^l = \left( (\tilde{e}_i^{\text{line}} \ \tilde{e}_i^\tau)^T \right)_{i=\overline{1,N}} \quad (8)$$

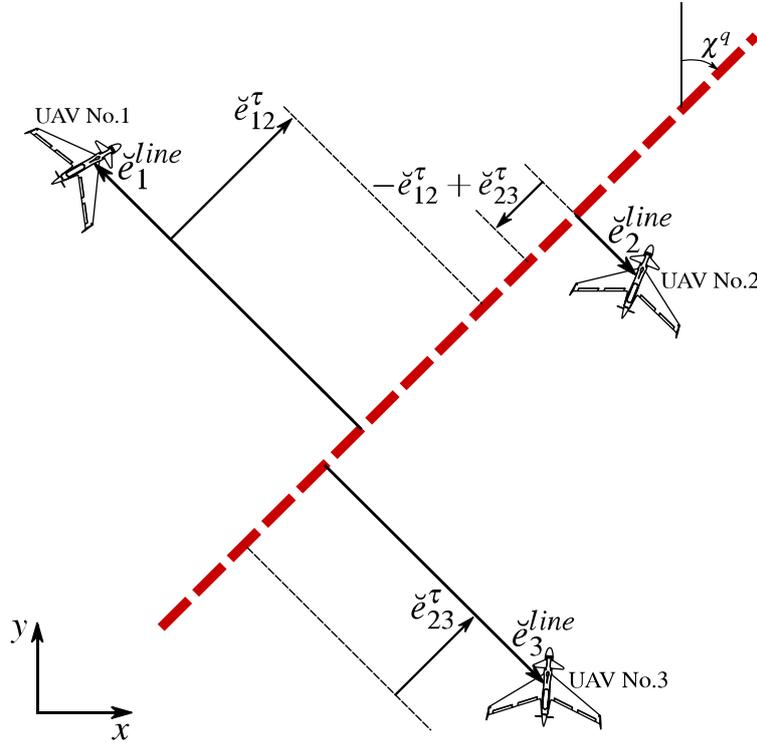
где  $\tilde{e}_i^{\text{line},\tau}$  – компоненты управляющего вектора, причем верхний индекс «line» указывает на ошибку в направлении перпендикулярном по отношению к конечному пути, а индекс « $\tau$ » – в продольном направлении по отношению к конечному пути.

Используя (6), вводится обозначение

$$\tilde{\mathbf{e}}^l \triangleq \mathcal{H} \left\{ (\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{M}_{\chi_q}) (\mathbf{e} \otimes [1 \ 0]^T + [\hat{\mathbf{e}}^n \ 0]^T \otimes [0 \ 1]^T) \right\} \in \mathbb{R}^{(2N-1) \times 1}, \quad (9)$$

где  $\mathcal{H}$  устанавливается согласно (7).

Рисунок 1 показывает пример определения символов, соответствующий (8) и (9), для строя из трех БПЛА при выходе на единый прямолинейный путь.



**Рис. 1** Пример определения символов для формирования строя трех БПЛА при ориентировании по прямолинейному пути. Иллюстрация из [9]

Дифференциальные уравнения строя БПЛА как объекта управления в этом случае можно представить в виде следующей динамической системы [9]:

$$\dot{\bar{e}}^l = \mathbf{g}^l(\mathbf{X} \circ (\mathbf{v}^g \otimes \mathbf{1}_2)), \quad (10)$$

где  $\circ$  – произведение Адамара;

$$\mathbf{g}^l = \mathcal{H}\left(\mathbf{I}_N \otimes \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \mathbf{K}^\tau \otimes \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\right) \in \mathbb{R}^{(2N-1) \times 2N},$$

матрица  $\mathbf{K}^\tau \in \mathbb{R}^{N \times N}$  задается как

$$\mathbf{K}^\tau \triangleq \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$\mathbf{v}^g = [v_1^g \quad \dots \quad v_N^g]^T$  – вектор путевых скоростей;

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_{\sin} \otimes [1 \quad 0]^T + \mathbf{X}_{\cos} \otimes [0 \quad 1]^T \in \mathbb{R}^{2N \times 1},$$

при этом  $\mathbf{X}_{\sin} = (\sin(\chi_i - \chi^q))_{i=1, \overline{N}} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$  и  $\mathbf{X}_{\cos} = (\cos(\chi_i - \chi^q))_{i=1, \overline{N}} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ .

Предлагается закон управления для скоростей БПЛА  $\mathbf{v}^{0l} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$  с учетом (8) в следующем виде [9, 10]:

$$\mathbf{v}^{0l} = (v_i^0)_{i=1,\overline{N}} = \left( \sqrt{\left( v \sin(\psi_i) - v_f^{line} \left( \frac{2}{\pi} \right) \arctg(k_v^{line} \tilde{e}_i^{line}) \right)^2 + \left( v \cos(\psi_i) + v_f^\tau \left( \frac{2}{\pi} \right) \arctg(k_v^\tau \tilde{e}_i^\tau) \right)^2} \right)_{i=1,\overline{N}}, \quad (11)$$

где  $k_v^{line,\tau}$  – положительные константы, от которых зависит плавность выхода аппаратов на заданные относительные положения;  $v_f^{line,\tau}$  – максимальные значения нормы векторов дополнительной скорости, которые должны быть выбраны согласно кинематическим ограничениям системы;  $v$  – крейсерская конечная скорость строя, оптимальная с точки зрения аэродинамических характеристик БПЛА. Угол  $\psi_i$  вычисляется как  $\psi_i = \chi^\infty \left( \frac{2}{\pi} \right) \arctg(k_\chi \tilde{e}_i^{line})$ , выбирается также  $\chi^\infty = -\frac{\pi}{2}$ .

Закон управления для курсового угла с учетом (8) предлагается как [9, 10]

$$\chi^{0l} = \left( \chi^q + \arcsin \left( \frac{\{v \sin(\psi_i) - v_f^{line} \left( \frac{2}{\pi} \right) \arctg(k_v^{line} \tilde{e}_i^{line})\}}{v_i^0} \right) \right)_{i=1,\overline{N}} \in \mathbb{R}^{N \times 1}. \quad (12)$$

С помощью прямого метода Ляпунова доказывается следующая теорема.

**Теорема [9].** Если законы управления  $\mathbf{v}^{0l}$  и  $\chi^{0l}$  задаются согласно уравнениям (11) и (12) соответственно, то в системе (10) точка равновесия  $\tilde{\mathbf{e}}^l = \mathbf{0}$  асимптотически устойчива в целом.

Далее, используя модель более высокого порядка (4), посредством нелинейного синтеза («бэкстеппинга») получены управляющие воздействия для БПЛА в таком виде [9]:

$$\boldsymbol{\eta}^c = \boldsymbol{\eta} + \underbrace{\mathcal{A} \mathbf{P}^{-1} (-\mathcal{K}^z \mathbf{z} + \partial_t \mathbf{d} - [\mathcal{Y}(\mathbf{A}^l)^T \mathbf{g}^l]^T)}_{\boldsymbol{\mu}} \in \mathbb{R}^{2N \times 1}, \quad (13)$$

где  $\boldsymbol{\eta} = \mathbf{v} \otimes [1 \ 0]^T + \chi \otimes [0 \ 1]^T \in \mathbb{R}^{2N \times 1}$  – вектор текущих скоростей и курсовых углов БПЛА строя;  $\mathcal{A} = \text{diag}(\alpha_1^v, \alpha_1^\chi, \dots, \alpha_i^v, \alpha_i^\chi, \dots, \alpha_N^v, \alpha_N^\chi) \in \mathbb{R}^{2N \times 2N}$  – диагональная матрица параметров систем «автопилот – БПЛА» в строю;  $\mathbf{P} = \text{diag}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_N) \in \mathbb{R}^{2N \times 2N}$  – блочная матрица, задаваемая через

$$\mathbf{p}_i = \begin{bmatrix} \sin(\chi_i - \chi^q) & v_i^g \cos(\chi_i - \chi^q) \\ \cos(\chi_i - \chi^q) & -v_i^g \sin(\chi_i - \chi^q) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times 2};$$

$\mathcal{K}^z$  – симметричная положительно определенная матрица;  $\partial_t \mathbf{d}$  – вектор производных

$$\mathbf{d} = \left\{ \left( v_i^d \sin(\chi_i^d - \chi^q) \quad v_i^d \cos(\chi_i^d - \chi^q) \right)^T \right\}_{i=1,\overline{N}} \in \mathbb{R}^{2N \times 1},$$

при этом  $v_i^d$  и  $\chi_i^d$  задаются через законы управления (11) и (12);

$$\mathbf{z} = \mathbf{X} \circ (\mathbf{v}^g \otimes \mathbf{1}_2) - \mathbf{X}^d \circ (\mathbf{v}^d \otimes \mathbf{1}_2),$$

при этом  $\mathbf{X}$  определяется так же, как и в уравнении (10), а  $\mathbf{X}^d$  отличается от  $\mathbf{X}$  только подстановкой  $v_i^d$  и  $\chi_i^d$  вместо  $v_i$  и  $\chi_i$  соответственно;  $\mathcal{Y}$  – положительная константа;

$$\mathbf{A}^l = \mathcal{H} \left( \begin{array}{c} \mathbf{A}^{line} \otimes [1 \ 0]^T + \\ + [\mathbf{A}_\tau \ 0]^T \otimes [0 \ 1]^T \end{array} \right) \in \mathbb{R}^{(2N-1) \times 1},$$

причем  $\mathbf{A}^{line} = \left( \arctg(\tilde{e}_i^{line}) \right)_{i=1,\overline{N}} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$  и  $\mathbf{A}_\tau = \left( \arctg(\tilde{e}_{i-1,i}^\tau) \right)_{i=2,\overline{N}} \in \mathbb{R}^{(N-1) \times 1}$ , а  $\tilde{e}_i^{line}$  – элементы вектора  $\tilde{\mathbf{e}}^l$  (9) на нечетных местах,  $\tilde{e}_{i-1,i}^\tau$  – на четных местах соответственно;  $\mathbf{g}^l$  задается так же, как и в уравнении (10).

На основании уравнения (13) формируется алгоритм группового управления БПЛА. Здесь  $N_i$  – множество всех БПЛА-агентов в группе.

**Теорема [9].** Пусть  $\mathbf{v}^d$ ,  $\chi^d$  определяются согласно с (11), (12) соответственно. Управляющие воздействия (13) гарантируют, что  $\check{\mathbf{e}}^l \rightarrow \mathbf{0}$ ,  $\forall i \in N_i$ ,  $|v_i^g - v| \rightarrow 0$  и  $\forall i \in N_i$ ,  $|\chi_i - \chi^q| \rightarrow 0$  асимптотически в целом при  $t \rightarrow \infty$ .

Показано, как может аналитически вычисляться производная  $\partial_t \mathbf{d}$  при информационном обмене данными БПЛА в группе.

Поскольку матрица параметров  $\mathcal{A}$  обычно заранее неизвестна и, кроме того, может меняться вследствие неопределенностей вектор управляющих воздействий (13) заменяется на

$$\boldsymbol{\eta}^c = \boldsymbol{\eta} + \hat{\mathcal{A}}\mathbf{P}^{-1}(-\mathcal{K}^z \mathbf{z} + \partial_t \mathbf{d} - [\gamma(\mathbf{A}^l)^T \mathbf{g}^l]^T), \quad (14)$$

и предлагается следующий закон адаптивной самонастройки:

$$\dot{\hat{\mathcal{A}}}^{\text{vect}} = -\mathbf{\Gamma} \text{diag}(\mu_1^v, \mu_1^\chi, \dots, \mu_N^v, \mu_N^\chi) \mathbf{P}^T \mathbf{z}, \quad (15)$$

где  $\hat{\mathcal{A}}$  – оценка матрицы  $\mathcal{A}$ ;  $\hat{\mathcal{A}}^{\text{vect}} \in \mathbb{R}^{2N \times 1}$  – вектор, составленный из элементов матрицы  $\hat{\mathcal{A}}$ ;  $\mathbf{\Gamma}$  – диагональная положительно определенная матрица;  $\mathbf{z}$  и  $\mathbf{P}$  задаются так же, как и в уравнении (13);  $\{\mu_1^v, \mu_1^\chi, \dots, \mu_N^v, \mu_N^\chi\}$  вычисляются как элементы вектора  $\boldsymbol{\mu}$  из уравнения (13).

**Теорема [9].** Пусть  $\mathbf{v}^d$ ,  $\chi^d$  определяются согласно с (11), (12) соответственно. При использовании закона адаптации параметров в виде (15) управляющие воздействия (14) гарантируют, что  $\check{\mathbf{e}}^l \rightarrow \mathbf{0}$ ,  $\forall i \in N_i$ ,  $|v_i^g - v| \rightarrow 0$  и  $\forall i \in N_i$ ,  $|\chi_i - \chi^q| \rightarrow 0$  асимптотически при  $t \rightarrow \infty$ .

### ФОРМИРОВАНИЕ И ПОДДЕРЖАНИЕ СТРОЯ БПЛА

Рассматривается задача формирования и поддержания строя БПЛА самолетного типа в случае общего конечного кругового пути. Выбирается вектор управляющих воздействий для углов сдвига фаз круговых формаций БПЛА в таком виде [15–17]:

$$\mathbf{e}_\theta \triangleq [e_1 \quad \dots \quad e_k \quad \dots \quad e_N]^T = \hat{\mathbf{M}}_\theta \check{\mathbf{e}}_\theta + \mathbf{D}, \quad (16)$$

где  $\mathbf{D} \triangleq -\mathbf{M}_\theta \mathbf{H}_\theta^{-1} (\mathbf{P}_{\theta d}^T, \hat{\mathbf{P}}_\theta)^T$  – управляющий системой вектор в пространстве относительных состояний;  $\mathbf{H}_\theta$  – матрица, определяемая аналогично матрице  $\mathbf{H}$  в (5);  $\mathbf{P}_{\theta d} \in \mathbb{R}^{(N-1) \times 1}$  – вектор желаемых относительных углов сдвига фаз,  $\hat{\mathbf{P}}_\theta = \sum_{k=1}^N \varphi_k$  – сумма текущих фазовых углов аппаратов в ИСК;  $\check{\mathbf{e}}_\theta = (\check{e}_{i,i+1})_{i=1, \overline{N-1}} \in \mathbb{R}^{(N-1) \times 1}$  – вектор текущих углов сдвига фаз для непосредственно взаимодействующих агентов, вычисляемый с помощью смешанного произведения векторов;  $\mathbf{M}_\theta \in \mathbb{R}^{N \times N}$  – матрица взаимодействия, которая задается аналогично матрице  $\mathbf{M}$  в (5);  $\hat{\mathbf{M}}_\theta \in \mathbb{R}^{N \times (N-1)}$  – матрица, получаемая из матрицы  $\mathbf{M}_\theta \mathbf{H}_\theta^{-1}$  удалением  $N$ -го столбца.

На рис. 2 показан пример определения символов для формирования и поддержания строя на примере группы из трех БПЛА.

Закон управления для скоростей БПЛА предлагается в этом случае в таком виде [15–17]:

$$\mathbf{v}^0 = [v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_N]^T = v \mathbf{1}_N + \mathbf{L}, \quad (17)$$

где  $\mathbf{1}_N = [1 \quad 1 \quad \dots \quad 1]^T \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ , и вектор  $\mathbf{L} = (v_f \left(\frac{2}{\pi}\right) \arctg[k_\theta(e_i)])_{i=1, \overline{N}} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$  определяется с учетом (16).

Закон управления для курсовых углов БПЛА [15–17]:

$$\chi^0 = (\chi_i^0)_{i=1, \overline{N}} = (\varphi_i + \lambda [\chi^{\text{path}} + \arctg(k_o(d_i - \rho))])_{i=1, \overline{N}} \in \mathbb{R}^{N \times 1}, \quad (18)$$

где угол  $\chi^{\text{path}}$  выбирается равным  $\frac{\pi}{2}$ ;  $\varphi_i$  – текущий фазовый угол  $i$ -го аппарата;  $k_o$  – положительный коэффициент, устанавливающий насколько плавно аппарат будет выходить на круговой путь;  $\lambda = \pm 1$  определяет направление вращения строя;  $\rho$  – радиус кругового пути;  $d_i$  – расстояния от центра вращения до  $i$ -го БПЛА.

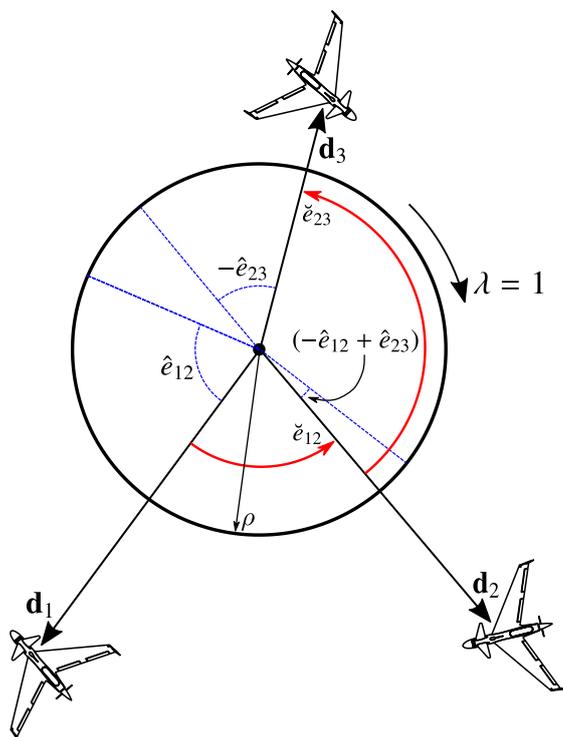


Рис. 2 Пример определения символов для круговых формаций. Иллюстрация из [17]

Дифференциальные уравнения строя БПЛА как объекта управления в этом случае можно представить в виде следующей динамической системы [15–17]:

$$\dot{\hat{e}}_{\theta}(\hat{e}_{\theta}) = \lambda K(\mathbf{v}^g \circ \mathbf{T} \circ \mathbf{X}_{sin}), \quad \hat{\mathbf{d}} \triangleq (\dot{d}_i - \dot{\rho})_{i=1, \overline{N}}, \quad (19)$$

где  $\hat{e}_{\theta} \in \mathbb{R}^{(N-1) \times 1}$  – вектор ошибок сдвига фаз БПЛА;  $\mathbf{X}_{sin}$ ,  $\mathbf{X}_{cos}$ ,  $\mathbf{v}^g$  определяются так же, как и в уравнении (10);  $\mathbf{K}$  – аналогично  $\mathbf{K}^T$  в (10), но без последней нулевой строки; вектор  $\mathbf{T} = \left(\frac{1}{d_i}\right)_{i=1, \overline{N}} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ ,  $\hat{\mathbf{d}}$  – вектор ошибок расстояний до кругового пути.

Прямым методом Ляпунова доказывается следующая теорема.

**Теорема** [16, 17]. Если законы управления для скорости  $\mathbf{v}^0$  и путевого угла  $\chi^0$  задаются согласно уравнениям (17) и (18) соответственно, то точки равновесия  $\hat{e}_{\theta} = \mathbf{0}$  и  $\hat{\mathbf{d}} = \mathbf{0}$  системы (19) асимптотически устойчивы в целом.

На основе рассуждений, аналогичных рассмотренным ранее для параллельных формаций, получены управляющие воздействия для БПЛА в случае формирования и поддержания круговых формаций, доказана теорема о гарантии сходимости скоростей и курсовых углов к задаваемым в законах управления (17) и (18). Наряду с этим указано, как может вычисляться необходимый вектор производных аналитически.

Далее предложен закон адаптивной интегральной самонастройки параметров систем «автопилот – БПЛА» строя, необходимой вследствие неизбежной их неопределенности в реальных условиях полета, а также представлены соответствующие адаптивные управляющие воздействия [17]. При этом доказано, что они вместе с законом интегральной самонастройки гарантируют сходимости скоростей и курсовых углов к задаваемым в законах управления (17) и (18). На основе этих управляющих воздействий формируются алгоритмы управления круговым строем БПЛА.

Самонастройка с помощью нечетких регуляторов в литературе использовалась в основном для одиночных аппаратов, и, кроме того, правила всегда выбирались эмпирическим путем без обоснования устойчивости.

Применен подход на основе нечетких функций Ляпунова, предложенный в работе Margaliot и Langholz [18], гарантирующий устойчивость контура адаптации [19, 20].

В качестве эталонной модели разработана модель строя, состоящего из унициклов второго порядка, учитывающих кинематические ограничения Дубинса (3). При этом вследствие децентрализации каждый БПЛА вычисляет выходные значения своей упрощенной модели динамики посредством данных, поступающих только от соседних агентов.

Использованы стандартные треугольные и трапецевидные функции принадлежности и дефазификатор центра тяжести для получения контроллера адаптации Мамдани-типа. При этом показано, что вычисление производной  $\dot{y}$  может быть осуществлено аналитически при информационном обмене между БПЛА в группе.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведены экспериментальные исследования предложенных методов и алгоритмов управления строем БПЛА с помощью имитационного моделирования.

Приведено математическое описание модели динамики полета БПЛА самолетного типа, используемой в среде MATLAB/Simulink для реализации полной нелинейной модели БПЛА с 12 состояниями и 6 степенями свободы (6-DoF). При этом показаны результаты вычисления в MATLAB/Simulink коэффициентов линеаризованной модели в пространстве состояний для балансировочного режима полета с постоянной скоростью и углом наклона траектории.

Представлен синтез стандартного автопилота БПЛА самолетного типа, используемого далее в модели строя БПЛА, на основе метода последовательного замыкания контура (англ. successive loop closure). Хотя синтез проводился для трехмерного движения БПЛА, в том числе и с возможностью выдерживания заданной высоты, для краткости приводится описание только для контуров управления углом курса и скоростью БПЛА.

Далее, на основе модели строя, состоящего из четырех БПЛА, описание моделей и автопилотов которых приведено ранее, реализована численная проверка предложенных алгоритмов управления. Рассмотрено по три варианта моделирования для каждого из двух сценариев формирования и поддержания строя БПЛА: сбор при ориентировании по прямолинейному пути и сбор при выходе на круговой путь. В первом варианте параметры моделей систем «автопилот – БПЛА» выбирались близкими к реальным значениям, найденным при настройке автопилота. Моделирование показало плавный выход всех четырех БПЛА в заданную геометрическую форму с сохранением устойчивости. Во втором варианте произвольно выбраны параметры моделей систем, значительно отличающиеся от реальных значений, при этом адаптация не применялась. В результате моделирования обнаружена потеря устойчивости строя со значительным перерегулированием и слабым затуханием переходных траекторий БПЛА. В третьем варианте параметры моделей систем «автопилот – БПЛА» назначены такими же, как и во втором варианте, отличающимися от реальных, но применена адаптивная параметрическая самонастройка. Результаты моделирования показали успешную работу алгоритмов адаптации, сохраняющую как устойчивость строя, так и качество переходных траекторий БПЛА, в этом случае близкое к полученным в первом варианте с точными параметрами [9, 17]. Также проведены сравнительные численные эксперименты: для параллельных формаций с методом асимметричного потенциального поля [9], для круговых формаций с методом неоднородного только по направлению векторного поля (метод Kingston и Beard) [17].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе [7] решена актуальная задача децентрализованного управления формированием и поддержанием строя БПЛА самолетного типа произвольной геометрической формы с учетом нелинейной динамики и ее неопределенности в реальных системах «автопилот – БПЛА».

Проведен анализ существующих подходов к решению задачи управления строем автономных роботов, в том числе автономных БПЛА, показавший, что наиболее распространенными являются централизованные методы, обычно позволяющие получать только равноудаленный строй, в силу простоты их анализа и реализации. Сформулирована постановка задач децентрализованного управления строем при следовании заданному пути для группы БПЛА.

Предложен метод неоднородного векторного поля для формирования и поддержания строя при следовании пути группой БПЛА, а также при сборе в форму при наличии только общего курсового угла строя. На основании данного метода предложены асимптотически устойчивые в целом методы управления, использующие разработанную для них архитектуру децентрализованного взаимодействия на основе консенсуса.

Разработаны алгоритмы формирования управляющих воздействий на базе предложенных методов управления с помощью нелинейного синтеза («бэкстеппинга»), гарантирующие сходимость курсовых углов и скоростей БПЛА к значениям, определяемым законами управления, и предоставляющие возможность дальнейшего использования адаптивного управления.

Разработаны алгоритмы параметрической адаптации, результатом работы которых является устойчивость строя и сохранение качества переходных траекторий каждого из БПЛА группы в том случае, если по какой-либо причине реальные параметры динамики системы «автопилот – БПЛА» хотя бы одного из аппаратов отличаются от первоначально выбранных для настройки законов управления и управляющих воздействий.

Реализована в MATLAB/Simulink имитационная модель строя с полной нелинейной динамикой БПЛА типа «летающее крыло» с 6 степенями свободы и 12 состояниями, оснащенных стандартными настроенными автопилотами, для исследования разработанных подходов. В данной модели выполнены вычислительные эксперименты с использованием группы из четырех БПЛА, показавшие эффективность предложенных методов и алгоритмов. По сравнению с методом асимметричного потенциального поля [21] в предлагаемом методе выявлены: более простая настройка алгоритмов управления, меньшее время сходимости при заданных начальных условиях (на 47%), отсутствие склонности к «чаттерингу», значительно меньшая интегральная путевая ошибка (на 40%). По сравнению с методом, предложенным Kingston и Beard [22], – меньшее время сходимости при заданных начальных условиях (на 50%), значительно меньшие как интегральная путевая ошибка (на 41%), так и интегральная ошибка относительных положений (на 67%).

В работе [23] показано, что представленный подход может быть успешно применен для следования путевым точкам группой БПЛА. Децентрализованные трехмерные формации БПЛА на основе предложенной концепции реализованы в [24]. В статье [25] исследована модификация данного подхода для осуществления учета ветровых возмущений в децентрализованной круговой формации БПЛА.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает признательность научному руководителю д-ру техн. наук, проф. Мунасыпову Рустэму Анваровичу за постановку задач и полезное обсуждение вопросов данного исследования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Kovács G. L. Artificial intelligence and Robotics in Digital Production and beyond // Системная инженерия и информационные технологии. 2021. Vol. 3. No. 1(5). Pp. 5-19. EDN KWRATY.
2. Метод реконфигурации кинематической структуры мехатронно-модульного робота в недетерминированных условиях / В. И. Петренко, Ф. Б. Тебуева, А. С. Павлов, М. М. Гурчинский // Системная инженерия и информационные технологии. 2020. Т. 2. № 2(4). С. 57-65. EDN EDHNSZ. [[ “Method for reconfiguring the kinematic structure of a mechatronic-modular robot in non-deterministic conditions” / V. I. Petrenko, F. B. Tebueva, A. S. Pavlov, M. M. Gurchinsky // System Engineering and Information Technologies. 2020, Vol. 2, No. 2(4), pp. 57-65. (In Russian). ]]
3. Kiss D., Tevesz G. The RTR path planner for differential drive robots // Системная инженерия и информационные технологии. 2020. Vol. 2. No. 2(4). Pp. 16-22. EDN ZPDFWH.

4. Вохминцев А. В. Методология решения проблемы одновременной навигации и построения карты на основе комбинирования визуальных и семантических характеристик окружающей среды // Системная инженерия и информационные технологии. 2023. Т. 5. № 3(12). С. 136-155. EDN EFOFFO. [[ Vokhmintsev A. V. "Methodology for solving the problem of simultaneous navigation and map construction based on combining visual and semantic characteristics of the environment" // System Engineering and Information Technologies. 2023, Vol. 5, No. 3(12), pp. 136-155. (In Russian). ]]
5. Муслимов Т. З., Мунасыпов Р. А. Проблемы поддержки принятия решений при групповом управлении БПЛА // Proceedings of the 2nd International Conference Intelligent Technologies for Information Processing and Management (ITIPM'2014). Уфа, 2014. С. 196-199. EDN VYEWXF. [[ Muslimov T. Z., Munasyrov R. A. "Problems of decision support for group control of UAVs" // Proceedings of the 2nd International Conference Intelligent Technologies for Information Processing and Management (ITIPM'2014). Ufa, 2014, pp. 196-199. (In Russian). ]]
6. Муслимов Т. З., Мунасыпов Р. А., Хабибуллина Р. Р. Интеллектуальная система поддержки принятия решений для группового управления автономными БПЛА // Proceedings of the 4th International Conference Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS'2016). Уфа, 2016. С. 193-195. EDN WJDUQT. [[ Muslimov T. Z., Munasyrov R. A., Khabibullina R. R. "Intelligent decision support system for group control of autonomous UAVs" // Proceedings of the 4th International Conference Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS'2016). Ufa, 2016, pp. 193-195. (In Russian). ]]
7. Муслимов Т. З. Методы и алгоритмы группового управления беспилотными летательными аппаратами самолетного типа: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (информационные и технические системы)» / Муслимов Тагир Забирович ; Уфимский гос. авиационный техн. ун-т. Уфа, 2020. 164 с. EDN SKVTJZ. [[ Muslimov T. Z. Methods and Algorithms for Group Control of Aircraft-type Unmanned Aerial Vehicles: dis. ... Cand. Tech. Sciences: spec. 05.13.01 "System analysis, management and information processing (information and technical systems)" / Tagir Zabirovich Muslimov; Ufa State Aviation Tech. Univ. Ufa, 2020. 164 pp. (In Russian). ]]
8. Муслимов Т. З., Мунасыпов Р. А. Децентрализованное групповое нелинейное управление строем беспилотных летательных аппаратов самолетного типа // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21. № 1. С. 43-50. DOI: 10.17587/mau.21.43-50 [[ Muslimov T. Z., Munasyrov R. A. "Decentralized group nonlinear control of a formation of aircraft-type unmanned aerial vehicles" // Mechatronics, Automation, Control. 2020, Vol. 21, No. 1, pp. 43-50. (In Russian). ]]
9. Muslimov T. Z., Munasyrov R. A. Consensus-based cooperative control of parallel fixed-wing UAV formations via adaptive backstepping // Aerospace Science and Technology. 2021. Vol. 109. DOI: 10.1016/j.ast.2020.106416
10. Муслимов Т. З. Алгоритмы управления строем автономных беспилотных летательных аппаратов самолетного типа с помощью метода векторного поля // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 187-214. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10407 [[ Muslimov T. Z. "Algorithms for controlling the formation of autonomous unmanned aerial vehicles of aircraft type using the vector field method" // Control, Communication, and Security Systems. 2019, No. 4, pp. 187-214. (In Russian). ]]
11. Yamaguchi H., Arai T. Distributed and autonomous control method for generating shape of multiple mobile robot group // Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. 1994. Vol. 2. P. 800-807. DOI: 10.1109/IROS.1994.407547
12. Yamaguchi H. A Cooperative Hunting Behavior by Mobile-Robot Troops // The International Journal of Robotics Research. 1999. Vol. 18. № 9. P. 931-940. DOI: 10.1177/02783649922066664
13. Yamaguchi H., Arai T., Beni G. A distributed control scheme for multiple robotic vehicles to make group formations // Rob. Auton. Syst. 2001. Vol. 36. № 4. P. 125-147. DOI: 10.1016/S0921-8890(01)00133-6
14. Мунасыпов Р. А., Муслимов Т. З. Групповое управление беспилотными летательными аппаратами на основе метода пространства относительных состояний // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19. № 2. С. 120-125. EDN YPJMGL. [[ Munasyrov R. A., Muslimov T. Z. "Group control of unmanned aerial vehicles based on the relative state space method" // Mechatronics, Automation, Control. 2018, Vol. 19, No. 2, pp. 120-125. (In Russian). ]]
15. Муслимов Т. З., Мунасыпов Р. А. Децентрализованное управление круговыми формациями беспилотных летательных аппаратов на основе метода векторного поля // Вестник УГАТУ. 2019. Т. 23. № 3(85). С. 112-121. EDN LOEPZX. [[ Muslimov T. Z., Munasyrov R. A. "Decentralized control of circular formations of unmanned aerial vehicles based on the vector field method" // Vestnik UGATU. 2019, Vol. 23, No. 3(85), pp. 112-121. (In Russian). ]]
16. Muslimov T. Z., Munasyrov R. A. Consensus-based cooperative circular formation control strategy for multi-UAV system // IEEE Int. Russian Automation Conf. (RusAutoCon). 2019. DOI: 10.1109/rusautocon.2019.8867733
17. Muslimov T. Z., Munasyrov R. A. Adaptive decentralized flocking control of multi-UAV circular formations based on vector fields and backstepping // ISA Transactions. 2020. Vol. 107. P. 143-159. DOI: 10.1016/j.isatra.2020.08.011
18. Margaliot M., Langholz G. New Approaches to Fuzzy Modeling and Control: Design and Analysis. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong: World Scientific, 2000. DOI: 10.1142/4446
19. Muslimov T. Z., Munasyrov R. A. UAV formation flight using non-uniform vector field and fuzzy self-tuning PD-control // IEEE Int. Russian Automation Conf. (RusAutoCon). 2018. DOI: 10.1109/rusautocon.2018.8501769
20. Muslimov T. Z., Munasyrov R. A. Multi-UAV cooperative target tracking via consensus-based guidance vector fields and fuzzy MRAC // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. 2021. Vol. 93. № 7. P. 1204-1212. DOI: 10.1108/AEAT-02-2021-0058
21. Kownacki C., Ambroziak L. Local and asymmetrical potential field approach to leader tracking problem in rigid formations of fixed-wing UAVs // Aerospace Science and Technology. 2017. Vol. 68. Pp. 465-474. DOI: 10.1016/j.ast.2017.05.040
22. Kingston D., Beard R.W. UAV splay state configuration for moving targets in wind // Advances in Cooperative Control and Optimization. Lecture Notes in Control and Information Sciences. Vol. 369. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. Pp. 109-128. DOI: 10.1007/978-3-540-74356-9\_7
23. Muslimov T., Munasyrov R. Cooperative guidance for waypoint following of distributed multi-UAV system // Interactive Collaborative Robotics. ICR 2020. Lecture Notes in Computer Science. 2020. Vol. 12336. Pp. 234-242. DOI: 10.1007/978-3-030-60337-3\_23

24. Muslimov T., Munasyrov R. Three-dimensional consensus-based control of autonomous UAV swarm formations // Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". Smart Innovation, Systems and Technologies. 2021. Vol. 187. Pp. 69-80. DOI: 10.1007/978-981-15-5580-0\_5

25. Muslimov T. Cooperative circumnavigation with robust vector field guidance for multiple UAVs in unknown wind environments // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2023. Vol. 109. №. 4. DOI: 10.1007/s10846-023-02000-3

*Поступила в редакцию 12 января 2024 г.*

#### МЕТАДААННЫЕ / METADATA

**Title:** Methods and algorithms for formation control of fixed wing unmanned aerial vehicles.

**Abstract:** The paper presents the results of research into the process of formation control of autonomous fixed wing unmanned aerial vehicles (UAVs) to improve the efficiency of formation maintenance control. This is achieved by developing methods and algorithms of decentralized control, considering the nonlinear structure of the "autopilot-UAV" systems. To achieve this goal the following tasks were set and solved: 1. Analysis of possible approaches to solving the problem of formation control and selection of those based on which the development of decentralized formation control of UAV is possible. 2. Synthesis of the autopilot of a single autonomous UAV that meets the requirements of the algorithm of formation control. 3. Development of methods and algorithms for formation control of UAVs, considering the peculiarities of the dynamics of real "autopilot-UAV" systems. 4. Modification of the obtained methods and algorithms to provide adaptive control in case of uncertain or changing dynamics of the "autopilot-UAV" system. 5. Development of a mathematical model in MATLAB/Simulink environment, which allows to simulate the control of UAV groups and to perform computational experiments to evaluate the effectiveness of the developed algorithms. The methodological basis of the work is based on the methods of linear algebra, formation control theory, Lyapunov functions method, methods of fuzzy logic theory, nonlinear control theory, adaptive control theory, computer modeling.

**Key words:** flocking control; swarm control; swarm robotics

**Язык статьи / Language:** русский / Russian.

#### Об авторе / About the author:

##### МУСЛИМОВ Тагир Забирович

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Россия.  
Ст. науч. сотр. кафедры автоматизации технологических процессов. Дипл. магистр (Моск. физ.-тех. ин-т, 2012). Канд. техн. наук по системному анализу, управлению и обработке информации (Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2020). Иссл. в обл. управления сложн. техн. объектами, робототехники, систем управления для групп автономных роботов.  
E-mail: tagir.muslimov@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9264-529X>

##### MUSLIMOV Tagir Zabirovich

Ufa University of Science and Technologies, Russia.  
Senior Researcher, Automation of Technological Processes Dept. Master's degree (Moscow Institute of Physics and Technology, 2012). Cand. Tech. Sci. (PhD) in system analysis, control, and information processing (Ufa State Aviation Technical University, 2020). Research in the field of control for complex technical objects, robotics, control systems for teams of autonomous robots.  
E-mail: tagir.muslimov@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9264-529X>