

УДК 681.5

## РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ В ГРУППЕ ЛИДЕР—ВЕДОМЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА\*

Ю. Н. Золотухин, К. Ю. Котов, А. С. Мальцев, А. А. Нестеров,  
М. А. Соболев, М. Н. Филиппов, А. П. Ян

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1  
E-mail: zol@idisys.iae.nsk.su*

Рассматривается задача управления движением мобильных роботов с дифференциальным приводом в группе лидер—ведомые. Предложенный метод структурного синтеза позволяет сформировать управляющие воздействия для роботов-ведомых группы только на основе информации относительного расположения ведомых и лидера без привлечения абсолютных пространственных координат роботов. Эффективность алгоритма управления подтверждается результатами численных экспериментов.

*Ключевые слова:* группа лидер—ведомые, управление группировкой мобильных роботов, структурный синтез систем автоматического управления, вынужденное движение.

**Введение.** В течение последних лет наблюдается возрастающий интерес к исследованиям в области управления группировками подвижных автономных объектов — мобильных роботов. Для таких задач, как поиск, наблюдение, транспортировка, аварийно-спасательные и военные операции, исследование океана, совместное использование подвижных роботов в группе более эффективно, чем применение одного робота. Замена сложного робота, способного решать комплекс задач, группой, состоящей из относительно простых и недорогих устройств, позволяет обеспечить свойства устойчивости и гибкости (адаптации) при решении поставленных задач. Примерами таких групп являются группировки спутников [1], автономных подводных [2], наземных [3] или воздушных [4] аппаратов.

В настоящее время можно выделить три основных подхода к управлению группой подвижных объектов: лидер—ведомый [5], ситуационный подход [3], виртуальные структуры [6]. В данной работе используется подход лидер—ведомые, предполагающий разделение членов группы на объекты-лидеры и объекты-ведомые. Задача объектов-ведомых — следование за лидером. Достоинством этого метода является относительная простота законов управления, а недостатком — зависимость успеха миссии группы от состояния объекта-лидера.

В отличие от работ [3, 7, 8], где для вычисления требуемого положения ведомого необходимо знать абсолютное положение и/или курс лидера, мы используем метод, в котором положение ведомого задаётся только в системе координат ведомого с привлечением информации об относительном взаимном расположении лидера и ведомого. Применение такого подхода более оправдано с точки зрения практических приложений. Как правило, мобильный робот в группе может обладать данными сенсоров только о взаимном расположении по отношению к другим роботам группы.

Одним из основных методов, используемых при синтезе законов управления движением объектов в группах, является метод линеаризации обратной связи [9], применение

---

\*Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-08-03233).

которого ограничивается сложностью кинематической модели, а также невысокой робастностью данного метода по отношению к внешним возмущениям. Значительное количество работ, посвящённых управлению роботами в группе лидер—ведомые, используют теорию систем с переменной структурой для организации законов управления, инвариантных к внешним возмущениям [10]. Существенным недостатком таких законов управления является возникновение высокочастотных переключений в управляющих сигналах.

В последнее время наблюдается повышенный интерес специалистов к методам пространственного (функционального, программно-координатного) управления, ориентированного на непосредственное решение задачи стабилизации движения по многообразию.

Для метода структурного синтеза (функционального управления), также развиваемого в данной работе, характерно доопределение относительного движения с помощью неявной модели [11]. К структурному синтезу можно отнести работы, в которых эталонное движение задаётся интегральным функционалом (например, [12]), и подход, предусматривающий использование в алгоритмах старших производных [13].

Недостатки существующих аналитических и экспериментальных исследований методов структурного синтеза, а также ряд функциональных недостатков существующих подходов определяют актуальность дальнейшего развития структурного синтеза замкнутых законов управления на основе организации движения системы вдоль предписанной траектории в пространстве состояний.

В данной работе используется метод организации вынужденного движения по желаемой траектории в пространстве состояний объекта [8, 14–16] в задаче управления движением однородной группы мобильных роботов с дифференциальным приводом.

Численные эксперименты подтверждают работоспособность системы управления в присутствии шумов измерений и внешних возмущений.

**Постановка задачи.** Рассмотрим однородную группу мобильных роботов, где уравнения кинематики и динамики  $i$ -го робота имеют следующий вид [3]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_i &= v_i \sin \phi_i, \\ \dot{y}_i &= v_i \cos \phi_i, \\ \dot{\phi}_i &= w_i, \\ \dot{v}_i &= F_i/m_i, \\ \dot{w}_i &= M_i/J_i. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь  $x_i, y_i$  — координаты объекта на плоскости;  $v_i, w_i$  — линейная и угловая скорости объекта;  $\phi_i$  — угол, характеризующий направление движения объекта относительно оси ординат;  $m_i$  — масса объекта;  $J_i$  — момент инерции объекта. К управляющим переменным относятся продольная движущая сила  $F_i$  и вращающий момент  $M_i$ . В (1) и далее точка над переменной обозначает её производную по времени.

Управление объектом осуществляется изменением параметров  $F_i/m_i$  и  $M_i/J_i$  — линейным и угловым ускорениями объекта. Выделим в группе объект-лидер, относительно которого остальные члены группы определяют свое положение и за которым следуют. Будем полагать, что движение лидера по предписанной траектории осуществляется согласно некоторому закону управления, например изложенному в [8]. Для описания движения остальных членов группы необходимо указать их место в группе относительно лидера. Считаем, что навигационная система робота-ведомого может определять следующие параметры расположения ведомого относительно лидера:  $d_i$  — расстояние до лидера,  $\alpha_i$  — направление на лидера относительно направления движения ведомого (рис. 1). Такие данные являются дальнометрической информацией и могут быть получены, например, с помощью лазерных сканеров.

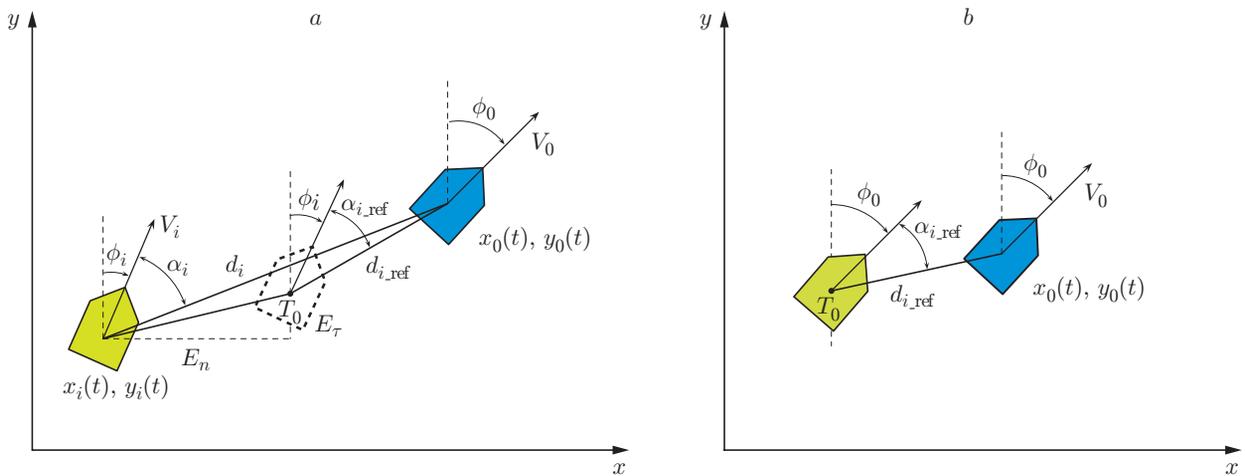


Рис. 1. Движение ведомого относительно заданного положения в группе: текущее и желаемое положения ведомого относительно лидера (а) и ориентация ведомого после достижения целевого положения (б)

Поставим перед роботом-ведомым задачу выхода в целевое положение  $T_0$ , заданное параметрами  $d_{i\_ref}$ ,  $\alpha_{i\_ref}$  относительного положения ведомого и лидера. Далее покажем, что после завершения переходных процессов в системе управления, т. е. в стационарном режиме, направления движения ведомого и лидера совпадают, следовательно, такой способ задания положения ведомого эквивалентен способу задания целевого положения с привлечением информации о направлении движения лидера. По этой же причине нет необходимости вводить дополнительное управление при приближении ведомого к целевому положению, как было сделано в [8].

Зададим ошибку в положении ведомого относительно целевого положения двумя величинами (рис. 1, а):

$$\left. \begin{aligned} E_{\tau i} &= d_i \cos(\phi_i + \alpha_i) - d_{i\_ref} \cos(\phi_i + \alpha_{i\_ref}), \\ E_{ni} &= d_i \sin(\phi_i + \alpha_i) - d_{i\_ref} \sin(\phi_i + \alpha_{i\_ref}). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Рассмотрим стационарный случай движения, когда  $\dot{E}_\tau = \dot{E}_n = 0$  и переходные процессы по отклонению от целевого положения завершены. Принимая во внимание, что

$$\left. \begin{aligned} d_i \cos(\phi_i + \alpha_i) &= y_0 - y_i, \\ d_i \sin(\phi_i + \alpha_i) &= x_0 - x_i, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

с учётом уравнений движения (1) вычислим (2):

$$\left. \begin{aligned} v_i \cos(\phi_i) &= v_0 \cos(\phi_0) + d_{i\_ref} \sin(\phi_i + \alpha_{i\_ref}) \dot{\phi}_i, \\ v_i \sin(\phi_i) &= v_0 \sin(\phi_0) - d_{i\_ref} \cos(\phi_i + \alpha_{i\_ref}) \dot{\phi}_i. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

При условии постоянства курсового угла  $\phi_i$  или при  $\dot{\phi}_i = 0$  из отношения первого и второго выражений в (4) легко получить  $\phi_i = \phi_0$  (рис. 1, б). Отсюда следует, что результирующее положение ведомого в группе не зависит от того, как определяется параметр  $\alpha_{i\_ref}$  целевого положения: относительно направления движения ведомого или лидера.

**Синтез алгоритма управления.** Широкий класс объектов управления, в частности механических систем, удобно описывать системой дифференциальных уравнений

$$\dot{x} = f(x, \lambda, u). \quad (5)$$

Здесь  $x = [x_1, \dots, x_n]^T$  — вектор-столбец переменных состояния системы;  $\lambda = [\lambda_1, \dots, \lambda_m]^T$  — вектор-столбец возмущающих воздействий;  $u = [u_1, \dots, u_r]^T$  — вектор-столбец управляющих воздействий. Для любой из координат  $x_i$  может быть указано задание  $\psi_i(t)$ . Более того,  $\psi_i(t)$  может являться функцией координат или выходных величин объекта [15].

Необходимое движение объекта обеспечивается определением старших производных регулируемых величин  $x_i$  [11]. Это значение старшей производной находится из требуемого дифференциального уравнения движения, связывающего регулируемую величину и задающее воздействие  $\psi_i = \psi_i(t)$ :

$$S_i(x_i, x_i^{(j)}, \psi_i, k_j) = 0, \quad (6)$$

где  $k_j$  — параметры настройки;  $i = 0, 1, 2, \dots, m$ ;  $j = 0, 1, 2, \dots, n_1$ . В данной работе используются только линейные дифференциальные уравнения (6).

Порядок требуемых дифференциальных уравнений (6) определяется порядком той производной ошибки, которая в любой момент времени явно зависит от управляющих воздействий. Для объектов управления, описываемых дифференциальными уравнениями, которые не разрешимы в алгебраической форме относительно управляющих воздействий, применяются различные методы решения нелинейных уравнений. Авторами предложен более простой с инженерной точки зрения метод поэтапного задания требуемых уравнений (6), позволяющий в итоге добиться явного выражения управляющих воздействий [15]. Далее задача синтеза формулируется по-разному:

1. Обеспечение движения системы в некоторой окрестности желаемой траектории.
2. Обеспечение точного соответствия движения системы заданному.

В первом случае можно организовать вынужденное движение системы в скользящем режиме вдоль траектории, заданной уравнениями (6) [8, 17]. Введём квадратичную функцию

$$S = 0,5(S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_m^2). \quad (7)$$

Выбирая управляющие параметры из условия

$$\dot{S} \leq 0, \quad (8)$$

обеспечим вынужденное движение системы в окрестности траектории (6). При достаточно больших значениях коэффициентов усиления в системе возможно возникновение скользящих режимов в пограничном слое [16] в окрестности заданной траектории.

Во втором случае авторами предлагается определить движение системы к заданной траектории (6) с помощью уравнений вида

$$\dot{S}_i = -\alpha_i S_i \quad (9)$$

(здесь  $\alpha_i$  — параметр настройки).

Легко заметить, что в данном случае также можно вычислить положительную функцию (7), производная которой с учётом (9) будет всюду отрицательна за исключением положения равновесия  $S = 0$ . Сравнение с алгоритмами [10], использующими методы теории систем с переменной структурой, проводится посредством записи уравнений (9) в виде

$$\dot{S}_i = -\alpha_i \text{sign}(S_i). \quad (10)$$

Очевидно, что основным недостатком подхода (10) является эффект высокочастотных переключений управляющих сигналов.

В рассмотренных случаях требуемое уравнение (6) представляет неполное задание [11], поскольку оно не включает высшую производную регулируемой величины. Требуемое значение высшей производной определяется из уравнений (8)–(10). Подставляя его в уравнение объекта, находим требуемое управление.

Вернёмся к исходной задаче. Согласно изложенной методике введём функции

$$\left. \begin{aligned} S_{1i} &= \dot{E}_{\tau i} + k_e E_{\tau i}, \\ S_{2i} &= \dot{E}_{ni} + k_e E_{ni}, \\ S_i &= \frac{1}{2}(S_{1i}^2 + S_{2i}^2) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

и выберем управляющие параметры, исходя из

$$\frac{d}{dt} S_i \leq 0. \quad (12)$$

Знак равенства в (12) допустим только при  $S_i = 0$ , что гарантирует выполнение условий

$$S_{1i} = 0; \quad S_{2i} = 0. \quad (13)$$

В случае  $S_i \neq 0$  выполнение условия  $\dot{S}_i < 0$  вынуждает систему двигаться в окрестности траектории, задаваемой уравнениями (13).

Вычислим

$$\dot{S}_i = S_{1i}\dot{S}_{1i} + S_{2i}\dot{S}_{2i}. \quad (14)$$

Используя (11) и уравнения движения (1), получим

$$\dot{S}_i = \frac{F_i}{m_i} (S_{1i} \cos(\phi_i) + S_{2i} \sin(\phi_i)) + \frac{M_i}{J_i} (S_{1i} \sin(\phi_i + \alpha_{i\_ref}) - S_{2i} \cos(\phi_i + \alpha_{i\_ref})) + \dots \quad (15)$$

Здесь многоточием обозначены члены, не содержащие управляющих параметров  $F_i$  и  $M_i$ . При отсутствии ограничений на переменные  $F_i$ ,  $M_i$  и с учётом требования (12) найдём управляющие параметры

$$\left. \begin{aligned} F_i/m_i &= -c_{1i}(S_{1i} \cos(\phi_i) + S_{2i} \sin(\phi_i)), \\ M_i/J_i &= -c_{2i}(S_{1i} \sin(\phi_i + \alpha_{i\_ref}) - S_{2i} \cos(\phi_i + \alpha_{i\_ref})), \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где  $c_{1i}$ ,  $c_{2i}$  — коэффициенты усиления по каналу управления скоростью и курсом соответственно. Очевидно, что при достаточно больших значениях коэффициентов  $c_{1i}$  и  $c_{2i}$  можно выполнить условие (12).

Отметим, что в уравнениях (2), (16) используется курсовой угол  $\phi_i$ , характеризующий направление движения ведомого в абсолютной системе координат. Если считать, что данная система координат связана с роботом, иначе говоря, является связанной, мы можем принять  $\phi_i = 0$  в уравнениях (2), (16):

$$\left. \begin{aligned} E_{\tau i} &= d_i \cos(\alpha_i) - d_{i\_ref} \cos(\alpha_{i\_ref}), \\ E_{ni} &= d_i \sin(\alpha_i) - d_{i\_ref} \sin(\alpha_{i\_ref}), \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} F_i/m_i &= -c_{1i}S_{1i}, \\ M_i/J_i &= -c_{2i}(S_{1i}\sin(\alpha_{i\_ref}) - S_{2i}\cos(\alpha_{i\_ref})). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Таким образом, управление роботом осуществляется только на основе информации относительного расположения ведомого и лидера, определяемой параметрами  $d_i$ ,  $\alpha_i$ . В данном подходе удаётся сформировать управляющие параметры в виде сравнительно простых функций отклонений объекта от желаемой траектории, однако время выхода на траекторию (13) при этом не определено.

Выполнение условий (13) можно обеспечить также при решении следующих неравенств:

$$\frac{d}{dt} S_{1i}^2 \leq 0; \quad \frac{d}{dt} S_{2i}^2 \leq 0. \quad (19)$$

Усилим условия (19), положив

$$\dot{S}_{1i} = -\alpha_1 S_{1i}; \quad \dot{S}_{2i} = -\alpha_2 S_{2i}. \quad (20)$$

Здесь  $\alpha_1 > 0$ ,  $\alpha_2 > 0$  определяют постоянные времена  $1/\alpha_1$ ,  $1/\alpha_2$ , с которыми  $S_{1i}$ ,  $S_{2i}$  экспоненциально стремятся к нулю. Дифференцируя соотношения (2) и подставляя результаты в (20) с учётом (1) и  $\phi_i = 0$ , получим

$$\left. \begin{aligned} \frac{F_i}{m_i} &= \ddot{y}_0 - d_{i\_ref} \left( \cos(\alpha_{i\_ref}) \dot{\phi}_i^2 + \sin(\alpha_{i\_ref}) \frac{M_i}{J_i} \right) - \alpha_1 S_{1i} - k_e \dot{E}_{\tau i}, \\ \frac{M_i}{J_i} &= \frac{1}{d_{i\_ref} \cos(\alpha_{i\_ref})} (v_i \dot{\phi}_i - \ddot{x}_0 + d_{i\_ref} \sin(\alpha_{i\_ref}) \dot{\phi}_i^2 + \alpha_2 S_{2i} + k_e \dot{E}_{ni}). \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

При условии равномерного движения величины ускорений  $\ddot{x}_0$ ,  $\ddot{y}_0$  лидера будем полагать равными нулю, тогда для использования соотношений (21) необходима дополнительная информация о скоростных характеристиках ведомого — параметрах  $v_i$  и  $\dot{\phi}_i$ . Эта информация может быть получена с помощью блока инерциальных датчиков на борту робота-ведомого.

**Результаты моделирования.** Проверка эффективности предложенного алгоритма управления проводилась посредством численного моделирования. В качестве объекта управления была выбрана модель робота "e-ruck" с дифференциальным приводом, в упрощённом виде задаваемая дискретными соотношениями

$$\left. \begin{aligned} x_i^k &= x_i^{k-1} + \Delta t v_i^k \sin \phi_i^k, \\ y_i^k &= y_i^{k-1} + \Delta t v_i^k \cos \phi_i^k, \\ \phi_i^k &= \phi_i^{k-1} + \Delta t w_i^k, \\ v_i^k &= \frac{1}{2a_0} (U_{1i}^k + U_{2i}^k), \\ w_i^k &= \frac{1}{2a_0 l} (U_{1i}^k - U_{2i}^k), \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

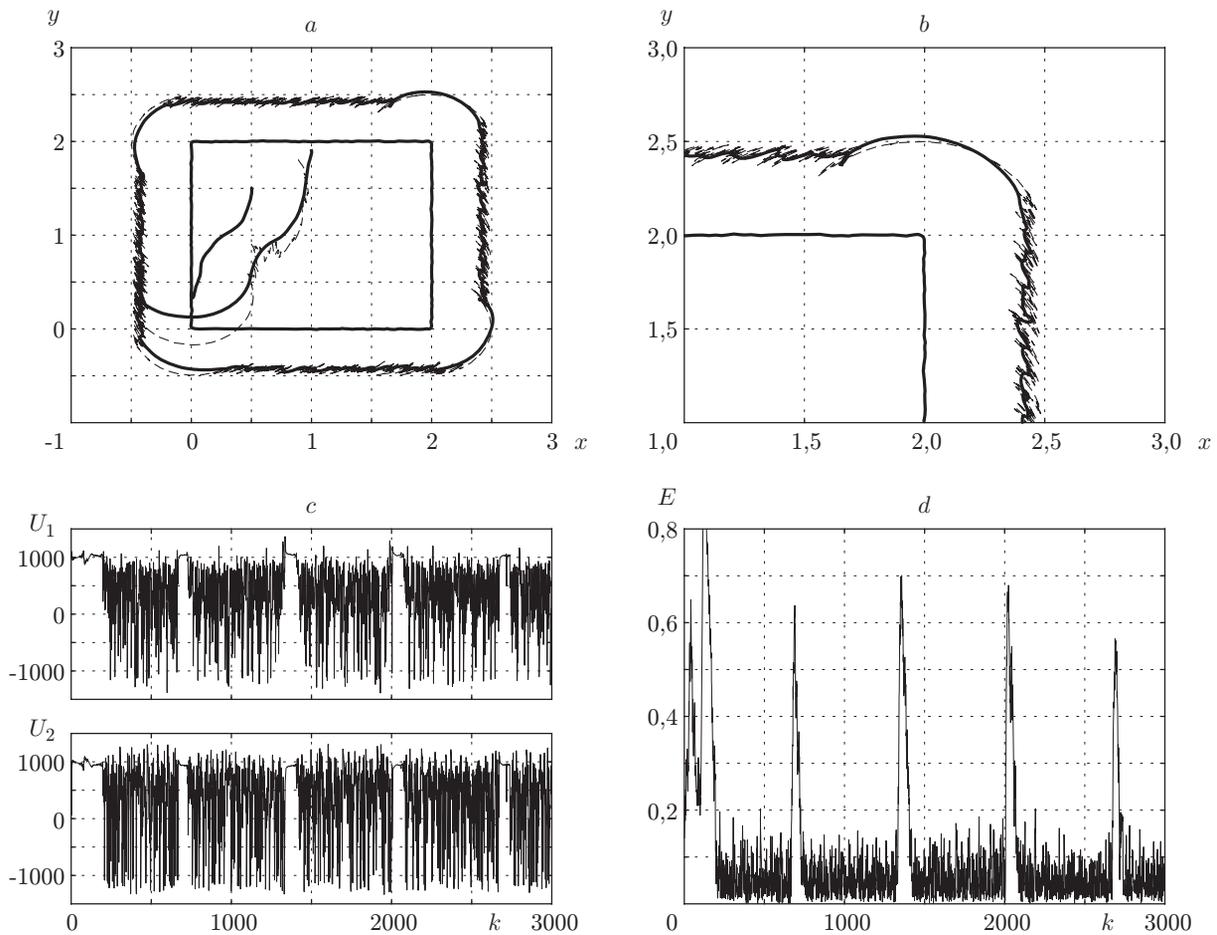


Рис. 2. Движение группы лидер—ведомый с использованием алгоритма [8]: *a* — траектория движения группы в плоскости  $(x, y)$ ; *b* — увеличенный фрагмент траектории движения группы; *c* — управляющие параметры; *d* — величина отклонения ведомого от заданного целевого положения

где постоянные коэффициенты  $1/(2a_0) = 0,0652 \cdot 10^{-3}$ ,  $2l = 0,05290$  м;  $\Delta t$  — шаг дискретизации по времени. Управляющие воздействия на колёсах  $U_{1i}^k + U_{2i}^k$ ,  $U_{1i}^k - U_{2i}^k$  соответствуют искомым  $F_i/m_i$  и  $M_i/J_i$ . Координаты положения и ориентации робота  $x_i^k$ ,  $y_i^k$ ,  $\phi_i^k$  зашумлялись аддитивным гауссовым шумом с разбросом  $\sigma_x = 0,001$  м,  $\sigma_y = 0,001$  м,  $\sigma_\phi = 0,05$  рад. Движение робота-лидера вдоль предписанной траектории осуществлялось согласно алгоритму управления, предложенному в [8].

На рис. 2 приведены результаты моделирования движения группы лидер—ведомый с использованием алгоритма управления [8]. Задание целевого положения для ведомого (рис. 2, *a*, пунктирная кривая) выполнялось относительно направления движения лидера. Следует отметить, что существенные флуктуации целевого положения возникали уже при незначительных колебаниях курсового угла лидера и приводили к отклонениям траектории движения ведомого от прямолинейной и резкой смене знаков управляющих воздействий, что неприемлемо для приводов робота (рис. 2, *c*). Одним из недостатков такого способа задания целевого положения является значительное ускорение ведомого, возникающее при поворотах лидера и приводящее к выходу управляющих воздействий ведомого на максимально допустимые значения (рис. 2, *b, c*).

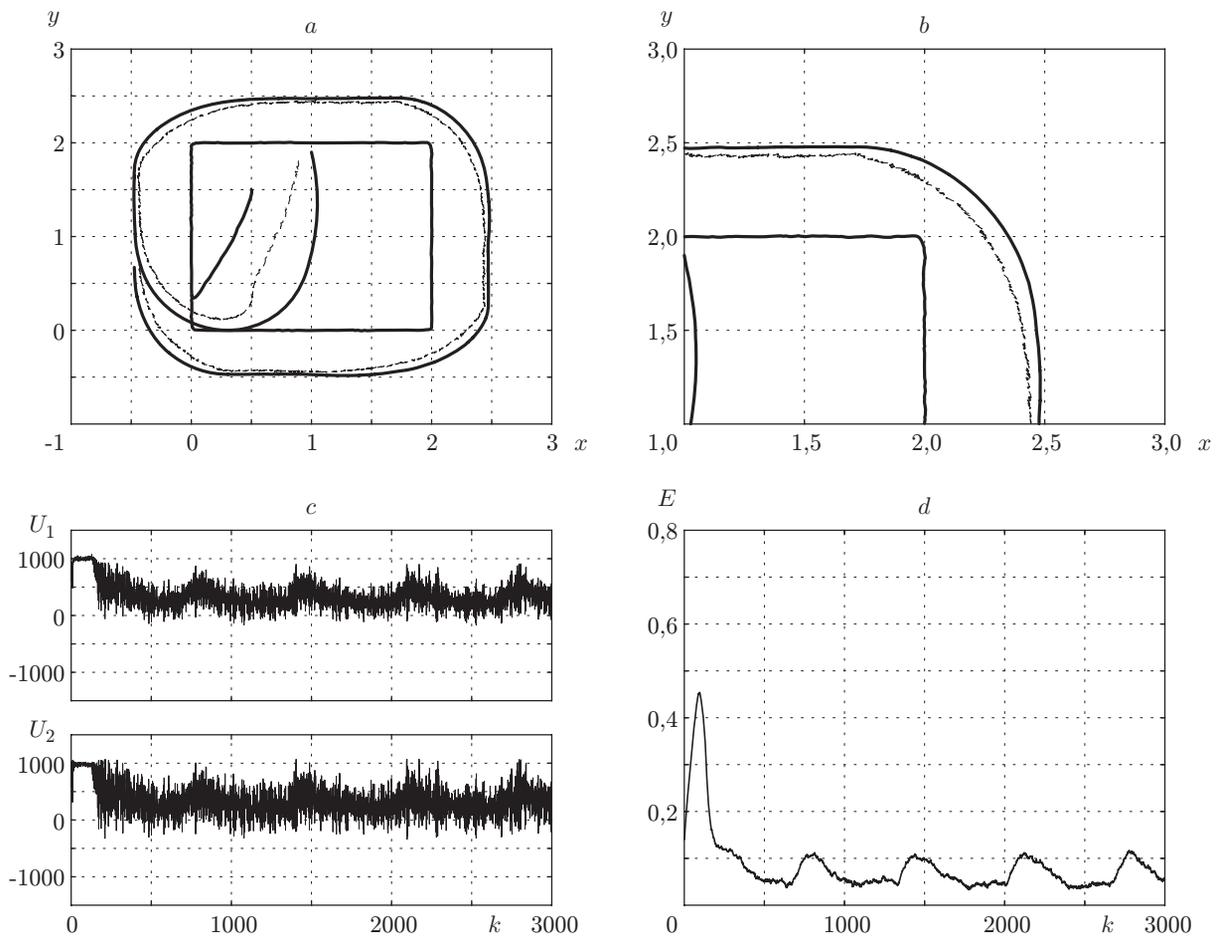


Рис. 3. Движение группы в составе лидер—ведомый на основе алгоритма (18) (пояснения к  $a$ — $d$  соответствуют рис. 2)

Показанное на рис. 3, 4 заданное целевое положение (пунктирные кривые) для робота-ведомого вычислялось как

$$\left. \begin{aligned} x_{i\_ref} &= x_0 - d_{i\_ref} \sin(\phi_i + \alpha_{i\_ref}), \\ y_{i\_ref} &= y_0 - d_{i\_ref} \cos(\phi_i + \alpha_{i\_ref}). \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Параметры целевого положения ведомого и управляющие параметры следующие:  $d_{1\_ref} = 0,5$  м,  $\alpha_{1\_ref} = 1,046$  рад,  $k_e = 10$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2 = 20$ .

Для возможности качественного сравнения алгоритмов из работы [8], (18) и (21) их постоянные параметры подбирались так, чтобы обеспечивалась одинаковая ошибка в отклонении ведомого от целевого положения.

Намного более гладкую траекторию перемещения целевого положения и робота-ведомого обеспечивает алгоритм (18). Среднеквадратическое отклонение от целевого положения составляет около 0,004 м в отличие от 0,04 м для алгоритма управления [8] на участках равномерного движения (рис. 2,  $d$  и 3,  $d$ ). При этом размах амплитуды колебаний управляющих воздействий достигает 0,5 от максимально допустимых значений (рис. 3,  $c$ ). Задание положения ведомого в группе относительно его текущей ориентации обеспечивает меньшее требуемое ускорение на поворотах траектории (рис. 3,  $a, b$ ).

Информация о скоростных характеристиках ведомого в алгоритме (21) позволяет использовать существенно меньший ресурс по управлению при движении с соизмеримой величиной отклонения ведомого от целевого положения (рис. 4,  $c$ ).

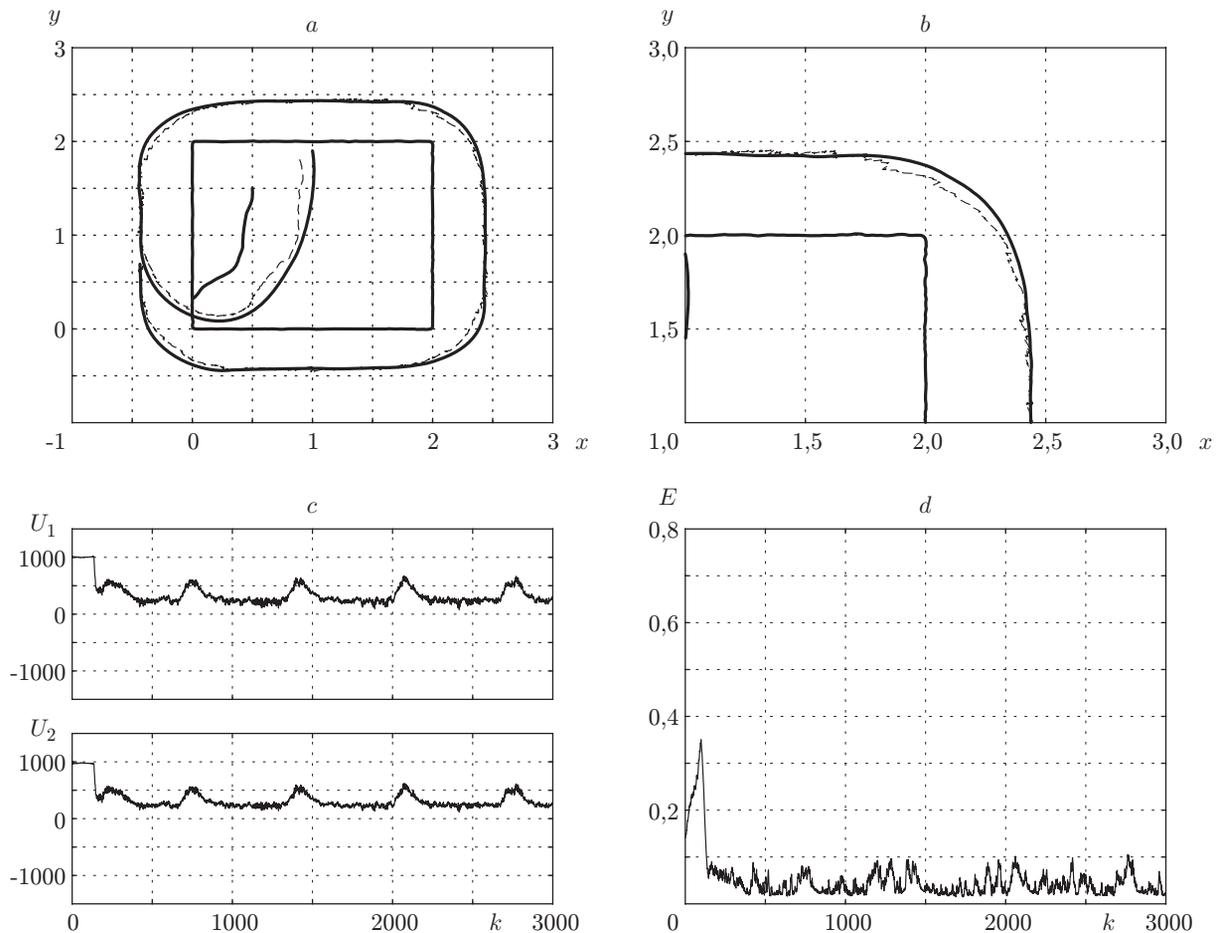


Рис. 4. Движение группы лидер—ведомый согласно алгоритму (21) (пояснения к  $a$ — $d$  соответствуют рис. 2)

**Заключение.** В данной работе предложен алгоритм управления мобильными роботами с дифференциальным приводом в составе маневрирующей группы лидер—ведомые. Применяемый авторами метод структурного синтеза позволяет сформировать управляющие воздействия для роботов-ведомых группы только на основе информации относительного расположения ведомых и лидера без привлечения абсолютных пространственных координат роботов. Рассматриваемый алгоритм управления обеспечивает гладкие траектории движения и высокую робастность по отношению к шумам измерений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schaub H., Vadali S. R., Junkins J. L., Alfriend K. T. Spacecraft formation flying control using mean orbit elements // Journ. Astronautical Sci. 2000. **48**, N 1. P. 69–87.
2. Smith T. R., Mann H. H., Leonard N. E. Orientation control of multiple underwater vehicles // Proc. of the 40th IEEE Conf. Decision and Control. Orlando, USA: IEEE, 2001. P. 4598–4603.
3. Lawton J. R., Beard R. W., Young B. J. A decentralized approach to formation maneuvers // IEEE Trans. Robotics and Automation. 2003. **19**, N 6. P. 933–941.
4. Burns R., McLaughlin C. F., Leitner J., Martin M. Techsat21: Formation design, control, and simulation // Proc. IEEE Aerospace Conf. Big Sky, USA: IEEE, 2000. Vol. 7. P. 19–25.

5. **Das A. K., Fierro R., Kumar V. et al.** A vision-based formation control framework // IEEE Trans. Robotics and Automation. 2002. **18**, N 5. P. 813–825.
6. **Lewis M. A., Tan K.-H.** High precision formation control of mobile robots using virtual structures // Autonomous Robots. 1997. **4**, N 4. P. 387–403.
7. **Consolini L., Morbidi F., Prattichizzo D., Tosques M.** Leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints // Automatica. 2008. **44**, N 5. P. 1343–1349.
8. **Золотухин Ю. Н., Котов К. Ю., Нестеров А. А.** Децентрализованное управление подвижными объектами в составе маневрирующей группы // Автометрия. 2007. **43**, № 3. С. 31–39.
9. **Desai J. P., Ostrowski J. P., Kumar V.** Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots // IEEE Trans. Robotics and Automation. 2001. **17**, N 6. P. 905–908.
10. **Morbidi F., Prattichizzo D.** Sliding mode formation tracking control of a tractor and trailer-car system // Robotics: Science and Systems III. 2007. P. 126–133.
11. **Бойчук Л. М.** Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. М.: Энергия, 1971. 112 с.
12. **Колесников А. А.** Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.
13. **Крутько П. Д.** Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели. М.: Наука, 1989. 328 с.
14. **Золотухин Ю. Н., Нестеров А. А.** Управление перевёрнутым маятником с учётом диссипации энергии // Автометрия. 2010. **46**, № 5. С. 3–10.
15. **Белоконь С. А., Золотухин Ю. Н., Мальцев А. С. и др.** Управление параметрами полёта квадрокоптера при движении по заданной траектории // Автометрия. 2012. **48**, № 5. С. 32–41.
16. **Белоконь С. А., Золотухин Ю. Н., Котов К. Ю. и др.** Использование фильтра Калмана в системе управления траекторным движением квадрокоптера // Автометрия. 2013. **49**, № 6. С. 14–24.
17. **Abramov A. I., Belokon' S. A., Kolodey V. V. et al.** Synchronous motor excitation control using fuzzy sliding mode // Proc. of the Second IASTED Intern. Multi-Conference "Automation, Control, and Applications (ACIT-ACA)". 2005. P. 475–480.

*Поступила в редакцию 24 февраля 2015 г.*

---