

УДК 007.52  
ББК 32.817

## **АЛГОРИТМ ЗАЩИТЫ АГЕНТОВ ОТ ВЗАИМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ В МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЕ**

**Казанин Д. К.<sup>1</sup>**

*(ПАО АНПП «Темп-Авиа»,*

*Арзамасский политехнический институт (филиал НГТУ),  
Арзамас)*

*Рассматривается групповой полёт гипотетических летательных аппаратов. Реализуется стратегия предотвращения их столкновений при формировании строя. Эта стратегия основана на развитии метода искусственного потенциального поля. Произведено математическое моделирование полученных алгоритмов, подтверждающее работоспособность предложенного подхода.*

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, мультиагентная система, система управления, предотвращение столкновений, искусственное потенциальное поле.

### **1. Введение**

В последние годы задачи группового управления мультиагентными системами привлекают большое внимание многих исследователей [5, 9, 11]. Наряду с чисто теоретическим интересом результаты решения этих задач имеют существенное практическое значение для систем беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), спутниковых группировок, автономных мобильных роботов различного назначения, а также для распределённых сенсорных сетей и т.д.

---

<sup>1</sup> *Дмитрий Константинович Казанин, инженер-математик, аспирант (kazanindk@gmail.com).*

Вопросы управления группой подвижных объектов в последнее время были хорошо изучены. Основной стратегией при управлении группировкой (формацией) является применение алгоритмов достижения консенсуса. Большинство работ по вопросам группового управления, основанного на этом алгоритме, представляют модель агента в виде системы линейных уравнений первого порядка [4],[5],[8],[11]-[13],[15]. Полученные результаты могут быть расширены до систем второго порядка [8], [13]. Такой подход, обычно, предполагает применение методов оптимизации [16] и линейных матричных неравенств (LMI) [6].

В работе [2] предложен подход к формированию строя БПЛА, основанный на алгоритме достижения консенсуса. Динамика объектов управления была выражена в виде системы линейных уравнений второго порядка. Однако столкновения между агентами, которые могут возникнуть в процессе формирования строя, не были рассмотрены.

Проблема защиты от столкновений, в силу ее практической значимости, в последнее время привлекает большое внимание исследователей. Для её решения были разработаны различные алгоритмы управления. Основные стратегии базируются на применении различных версий барьерных функций и методах прогноза. Например, метод искусственного потенциального поля [3], [17] и управление с прогнозирующими моделями [7], [14]. Метод, основанный на искусственном потенциальном поле, активно применяется в области автономной навигации роботов. Суть его заключается в том, что для целевых точек задаются поля притяжения, а для препятствий – отталкивающие поля, и объекты управления движутся вдоль отрицательного градиента обобщённого потенциального поля.

В [2] предложен алгоритм, который обеспечивает формирование строя на основе достижения консенсуса в сетевой модели группового полета. Цель этой статьи – объединить этот алгоритм с алгоритмом защиты от столкновений между агентами в процессе формирования строя и доказать его работоспособность математическим моделированием. Для решения используется

развитие предложенного в [10] метода искусственного потенциального поля.

## 2. Постановка задачи

Рассмотрим  $N$  гипотетических беспилотных летательных аппаратов. Полная линейная модель динамики каждого агента представлена следующей системой дифференциальных уравнений [1]:

$$(1) \left\{ \begin{array}{l} \ddot{\mathcal{G}} + a_1 \dot{\mathcal{G}} + a_2 \alpha + a_{32} \delta_2 + a_{33} \delta_3 = 0, \\ a_4 \alpha + a_{52} \delta_2 + a_{53} \delta_3 = \dot{\mathcal{G}}, \\ \mathcal{G} = \theta + \alpha, \\ \ddot{\psi} + b_1 \dot{\psi} + b_{11} \dot{\gamma} + b_2 \beta + b_{31} \delta_1 + b_{32} \delta_2 + b_{33} \delta_3 = 0, \\ b_4 \beta + b_{51} \delta_1 + b_{52} \delta_2 + b_{53} \delta_3 = \dot{\psi}, \\ \psi = \varphi + \beta, \\ \ddot{\gamma} + c_1 \dot{\gamma} + c_{11} \dot{\psi} + c_2 \beta + c_{31} \delta_1 + c_{32} \delta_2 + c_{33} \delta_3 = 0, \\ \sigma_{\mathcal{G}} = i_a \mathcal{G} + \rho_a \dot{\mathcal{G}}, \\ \sigma_{\psi} = i_i \psi + \rho_i \dot{\psi}, \\ \sigma_{\gamma} = i_y \gamma + \rho_y \dot{\gamma}, \\ \delta_1 = k_{11} \sigma_{\mathcal{G}} + k_{12} \sigma_{\psi} + k_{13} \sigma_{\gamma}, \\ \delta_2 = k_{21} \sigma_{\mathcal{G}} + k_{22} \sigma_{\psi} + k_{23} \sigma_{\gamma}, \\ \delta_3 = k_{31} \sigma_{\mathcal{G}} + k_{32} \sigma_{\psi} + k_{33} \sigma_{\gamma}, \end{array} \right.$$

где  $\alpha, \beta, \gamma, \mathcal{G}, \psi, \theta, \varphi$  – углы атаки, скольжения, крена, тангажа, рыскания и траекторные углы;  $\sigma_{\mathcal{G}}, \sigma_{\psi}, \sigma_{\gamma}$  – каналные управляющие сигналы системы автоматического управления (САУ);  $\delta_i$  – углы отклонения рулей ЛА;  $i_{в,н,э}, \rho_{в,н,э}$  – передаточные числа САУ по позиционным и демпфирующим сигналам;  $k_{i,j}$  – передаточные числа блока кинематической разводки рулей;  $a_i, a_{ij}, b_i, b_{ij}, c_i, c_{ij}$  – аэродинамические коэффициенты.

Аналогично работе [2] предполагается, что, пуск объектов (БПЛА) производится с носителя поочередно в разные моменты времени. Начальные координаты движения объектов соответствуют координатам носителя в момент пуска. Каждый объект движется за виртуальным лидером (следует заданной траектории). Алгоритмы управления продольным, боковым движением и движением в канале тяги выводят БПЛА на заданные координаты относительно виртуального лидера, что приводит к формированию строя, но не гарантирует защиту от взаимных столкновений.

В процессе формирования строя объекты управления должны избегать столкновения между собой. В частности каждый агент должен стремиться выйти на заданную позицию, не допуская при этом опасного сближения с соседними агентами. Заданная позиция определяется исходя из геометрической формы строя БПЛА.

Для достижения поставленной цели сделаны следующие допущения:

1. каждый объект управления имеет информацию о виртуальном лидере и двунаправленный канал связи с каждым агентом в сети;
2. моделируемый виртуальный лидер движется независимо от других агентов.

### ***3. Предотвращение столкновений***

Рассмотрим алгоритм защиты от столкновений для группы БПЛА, основанный на методе искусственного потенциального поля.

Суть метода заключается в том, что при обнаружении риска столкновения между агентами в системе управления каждого агента автоматически формируются управляющие сигналы для продольного, бокового канала и канала тяги, в результате чего объекты управления выходят на безопасное расстояние друг относительно друга.

Как показано на рисунке 1, область безопасности задаётся относительно центра масс БПЛА и представлена в виде сферы с радиусом  $R$ . Как только сферы двух и более агентов начинают пересекаться между собой, включается алгоритм предотвращения столкновений, который непрерывно действует до того момента, пока не будут изолированы области безопасности всех объектов управления в системе.

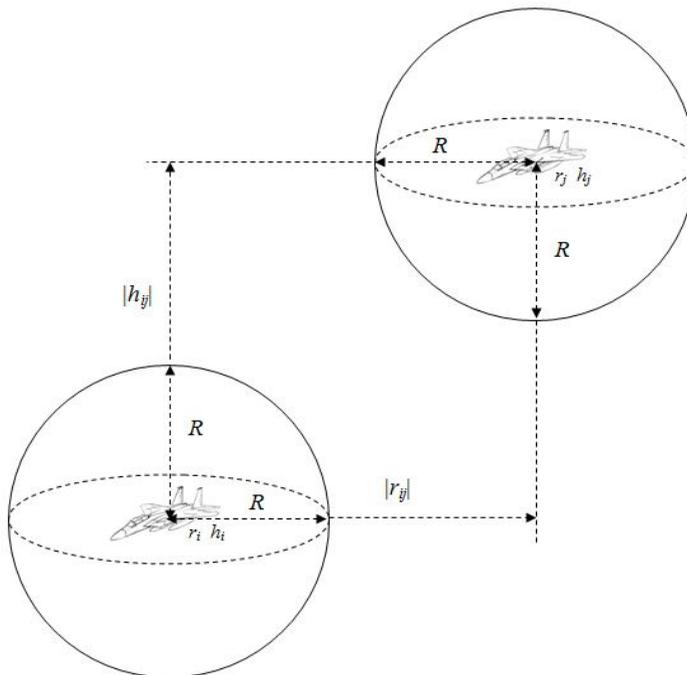


Рис. 1. Области безопасности БПЛА

Рассмотрим алгоритм защиты от столкновений для продольного канала. Пусть  $r_i$  и  $h_i$  - позиция в горизонтальной плоскости и высота, на которой расположен  $i$ -ый агент. Тогда  $|r_{ij}|$  и  $|h_{ij}|$  - относительное расстояние в горизонтальной плоскости и отклонение по высоте между  $i$ -ым и  $j$ -ым агентами соответственно (2):

$$(2) \quad \begin{aligned} |r_{ij}| &= \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (z_i - z_j)^2}, \\ |h_{ij}| &= |h_i - h_j|, \\ i, j &\in \{1, \dots, N\}. \end{aligned}$$

Искусственное потенциальное поле, создаваемое агентами  $i$  и  $j$ , определяется следующим образом (3):

$$(3) \quad U_{hij} = \begin{cases} K_h \cdot \left( \frac{1}{|h_{ij}| + 1} - \frac{1}{2R + 1} \right)^2, & (|h_{ij}| \leq 2R) \wedge (|r_{ij}| \leq 2R) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

где  $U_{hij}$  – потенциал искусственного поля в продольном канале для  $i$ -го и  $j$ -го агентов;  $K_h$  – положительный коэффициент усиления, определяющий допустимый уровень отклонения агента от границы области безопасности.

Согласно выражению (3) с увеличением  $|h_{ij}|$  потенциал поля между  $i$ -ым и  $j$ -ым агентами уменьшается. Кроме того, потенциал равен 0, когда области безопасности агентов  $i$  и  $j$  не пересекаются.

Впервые такой подход предложен в [10] для систем квадрокоптеров, но для целей данной работы алгоритмы [10] не подходят, поскольку в [10] решалась одноканальная задача и область безопасности являлась цилиндрической.

Пусть имеется  $M$  агентов ( $M < N$ ), области безопасности которых пересекаются с соответствующей областью  $i$ -го агента. Тогда средний потенциал  $U_{hi}$  определяется по формуле (4):

$$(4) \quad U_{hi} = \frac{1}{M} \sum_{\substack{j=1, j \neq i, \\ U_{hij} \neq 0}}^N U_{hij}.$$

Результирующее искусственное потенциальное поле  $U_{hc}$ , создаваемое всеми БПЛА в продольных каналах, вычисляется согласно выражению (5):

$$(5) \quad U_{hc} = \sum_{i=1}^N U_{hi}.$$

Для предотвращения столкновения  $i$ -го агента с другими агентами в продольный канал подаётся управляющий сигнал  $f_{hcavi}$  (6):

$$(6) \quad f_{hcavi} = -\nabla_{h_i} U_{hc}.$$

Для всей системы получаем (7):

$$(7) \quad f_{hcav} = -\nabla_h U_{hc} = -\left[ \frac{\partial U_{hc}}{\partial h_1}, \frac{\partial U_{hc}}{\partial h_2}, \dots, \frac{\partial U_{hc}}{\partial h_N} \right]^T.$$

В результате управляющий сигнал действует в сторону уменьшения потенциала и увеличения отклонения по высоте между агентами в системе.

Общее управление для  $i$ -го агента в продольном канале  $h_{i\text{зад}}$  (заданная высота полёта) вычисляется следующим образом (8):

$$(8) \quad h_{i\text{зад}} = f_{hformi} + f_{hcavi},$$

где  $f_{hformi}$  – управляющий сигнал для формирования строя (заданная высота  $i$ -го агента в строю).

Продольное движение для  $i$ -го агента реализуется согласно законам управления, полученным в [2] на основе достижения консенсуса для группы агентов, описываемых моделями (1):

$$(9) \quad n_{iy\text{зад}} = k_{ih} \cdot \Delta h_i + k_{idh} \cdot v_{iy} + \cos \theta_i, \quad \Delta h_i = h_i - h_{i\text{зад}},$$

$$(10) \quad n_{iy\text{зад}} = \frac{v_i^2 \cdot (1 - \cos \theta_i)}{g \cdot \Delta h_i} + \cos \theta_i,$$

где  $n_{iy\text{зад}}$  – заданная перегрузка для продольного канала;  $h_i$  – текущая высота полёта;  $v_{iy}$  – проекция скорости;  $\theta_i$  – траекторный угол;  $k_{ih}$ ,  $k_{idh}$  – коэффициенты ПД-регулятора;  $v_i$  – модуль скорости полёта;  $g$  – ускорение свободного падения.

Полученное в итоге управление для  $i$ -го агента обеспечивает защиту от столкновений и формирование строя в продольном канале. Аналогично реализуются законы управления для бокового канала и канала тяги.

#### **4. Моделирование**

В рамках движения группы гипотетических БПЛА на основе полных нелинейных моделей каждого агента было проведено моделирование алгоритма предотвращения столкновений между объектами управления.

На протяжении всего времени полёта агенты движутся по заданным координатам относительно виртуального лидера, формируя при этом строй. Затем выбираются два БПЛА, координаты которых отличаются между собой только по одному каналу, и в определённый момент один из агентов производит отклонение в сторону другого. Тем самым возникает риск столкновения БПЛА, которое система управления должна предотвратить.

Результаты моделирования представлены на рисунках 2-9. Рисунки 2, 4 и 8 демонстрируют защиту от столкновений в боковом и продольном каналах соответственно (сплошная линия – траектория агента 1, пунктирная линия – траектория агента 2). Видно, что при опасном сближении траектории начинают расходиться. На рисунках 3, 5-7 и 9 можно наблюдать ненулевое расстояние между двумя агентами в боковом канале, канале тяги и продольном канале.

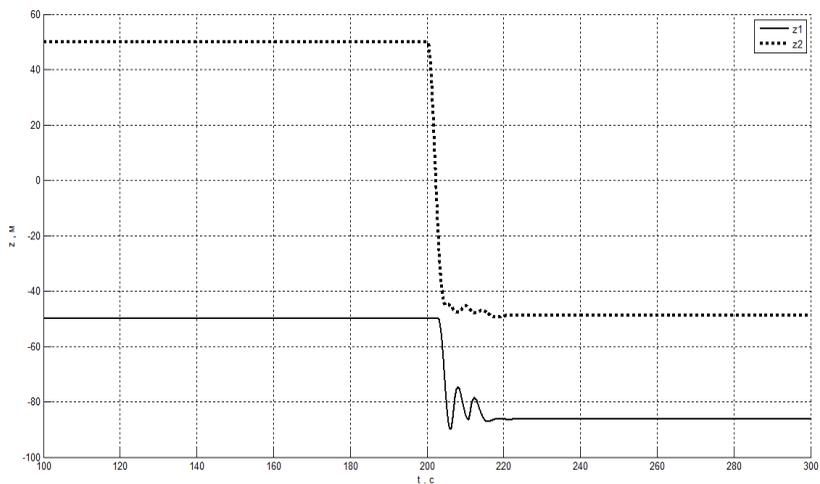


Рис. 2. Боковой канал

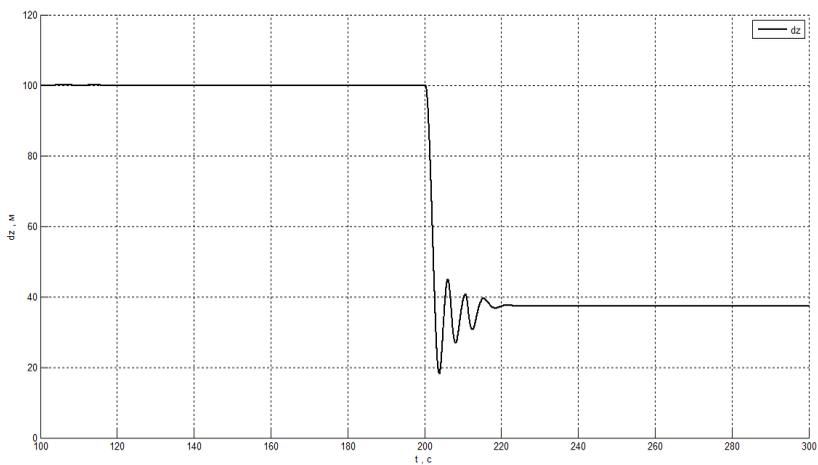


Рис. 3. Расстояние между агентами в боковом канале

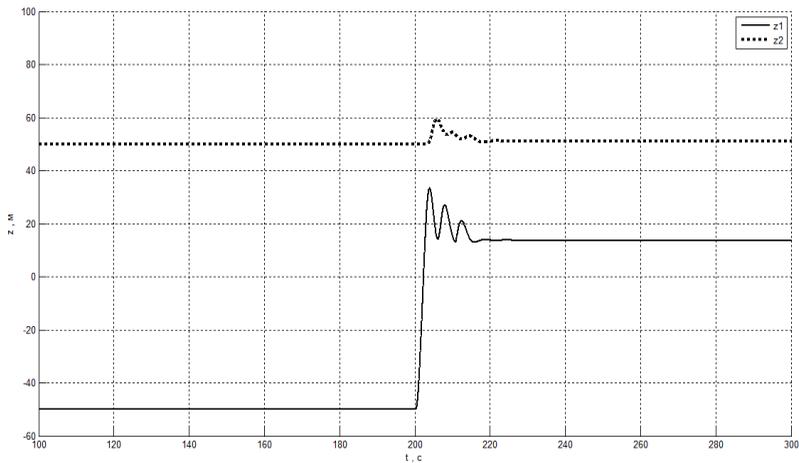


Рис. 4. Боковой канал

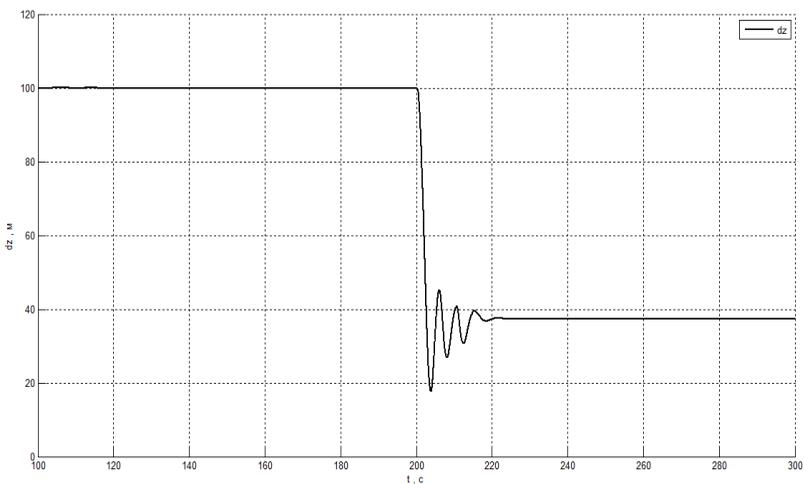


Рис. 5. Расстояние между агентами в боковом канале

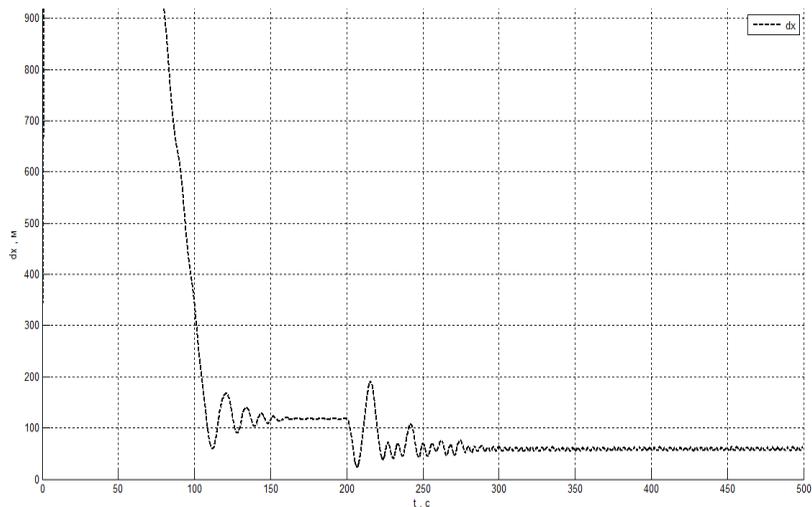


Рис. 6. Расстояние между агентами в канале тяги

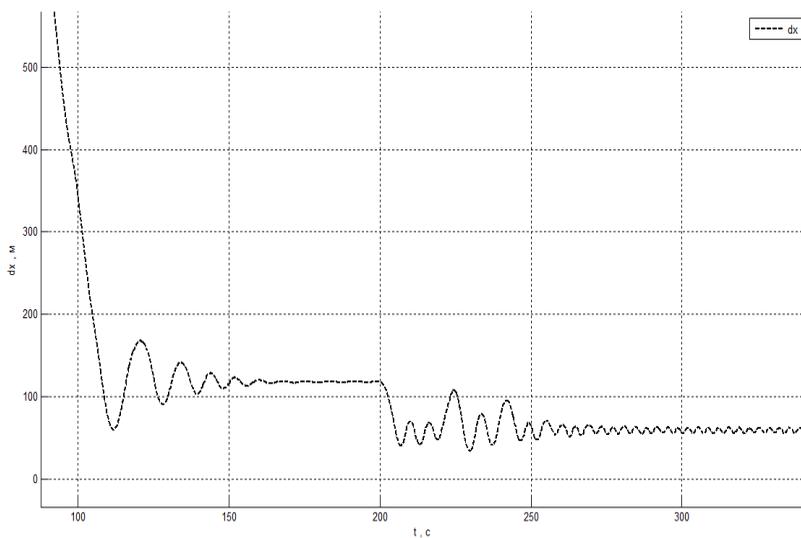


Рис. 7. Расстояние между агентами в канале тяги

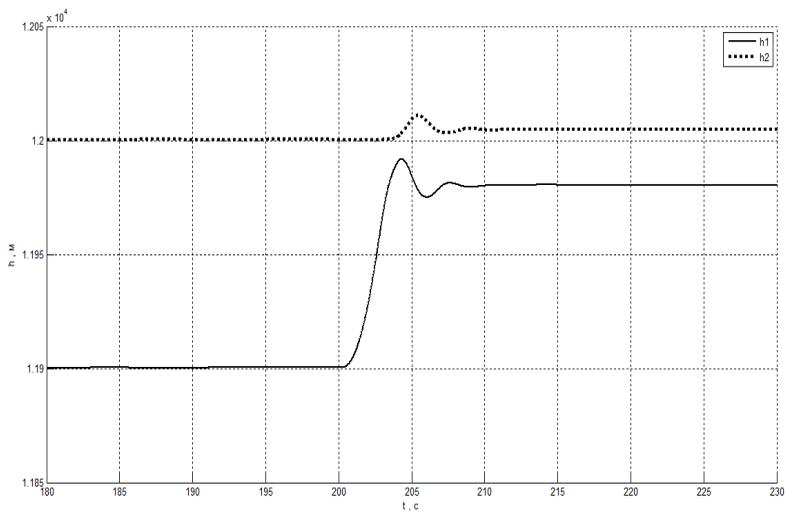


Рис. 8. Продольный канал

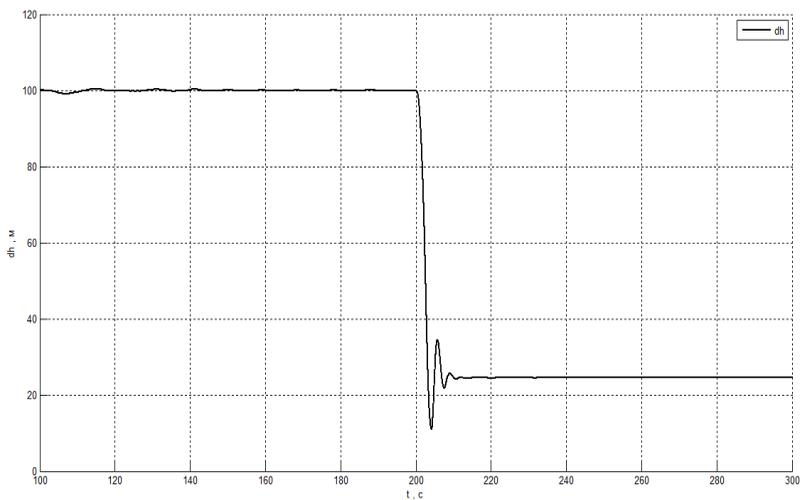


Рис. 9. Расстояние между агентами в продольном канале

## 5. Выводы

1. Разработан алгоритм, обеспечивающий защиту от столкновений летательных аппаратов при групповом полете в процессе формирования строя, в рамках сетевой модели с применением искусственного потенциального поля.

2. Результаты моделирования на основе полных нелинейных моделей объектов подтверждают работоспособность и эффективность предложенного алгоритма предотвращения столкновений.

## Литература

1. АБАДЕЕВ Э. М., ЛЯПУНОВ В. В., ТРУСОВ В. Н. *Основы формирования облика систем управления авиационного ракетного вооружения* // Издательско-торговая корпорация «Дашков и К<sup>о</sup>» – 2012.
2. КАЗАНИН Д. К. *Частный алгоритм управления мультиагентной системой* // Авиакосмическое приборостроение. – М.: НаучТехЛитИздат, №11, 2015г. – С. 27–34.
3. ATINC G. M. *Collision-Free Trajectory Tracking While Preserving Connectivity in Unicycle Multi-Agent Systems* // American Control Conference. – 2013. – P. 5392–5397.
4. CAO Y., REN W. *Optimal Linear-Consensus Algorithms: An LQR Perspective* // IEEE T. On Systems, Man, And Cybernetics - Part B: Cybernetics. – 2010. – Vol. 40, No. 3. – P. 819–830.
5. FAX J., OLFATI-SABER R., MURRAY R. *Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems* // Proceedings of the IEEE. – 2007. – Vol. 95, No. 1. – P. 215–233.
6. GHADAMI R., SHAFAI B. *Distributed H2 Control of Multi-Agent Dynamic Systems: Continuous-Time Case* // American Control Conference. – 2010. – P. 3969–3974.

7. HAFREZ A. T. *Encirclement of Multiple Targets using Model Predictive Control* // American Control Conference. – 2013. – P. 3147–3152.
8. MENG Z., REN W. *Leaderless and Leader-Following Consensus With Communication and Input Delays Under a Directed Network Topology* // IEEE T. on Systems, Man, and Cybernetics. – 2011. – Vol. 41, No. 1. – P. 75–88.
9. MURRAY R. *Recent Research in Cooperative Control of Multivehicle Systems* // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 2007. – Vol. 129. – P. 571–583.
10. NAMERIKAWA T., KURIKI Y. *Consensus-based Cooperative Formation Control with Collision Avoidance for a Multi-UAV System* // American Control Conference. – 2014. – P. 2077-2082.
11. OLFATI-SABER R., MURRAY R. *Consensus Problems in Networks of Agents with Switching Topology and Time-Delays* // IEEE T. on Automatic Control. – 2004. – Vol. 49, No. 9. – P. 1520–1532.
12. REN W. *Consensus Tracking Under Directed Interaction Topologies: Algorithms and Experiments* // IEEE T. on Control Systems Technology. – 2010. – Vol. 18, No. 1. – P. 230–237.
13. REN W. *Information consensus in multivehicle cooperative Control* // IEEE Control Systems magazine. – 2007. –Vol. 27, No. 2. – P. 71–82.
14. RICHARDS A., HOW J. *Decentralized Model Predictive Control of Cooperating UAVs* // Decision and Control (CDC), IEEE 43rd Annual Conference. – 2004. – P. 4286–4291.
15. SORESEN N., REN W. *Distributed coordination architecture for multi-robot formation control* // Robotics and Autonomous Systems. – 2008. – Vol. 56. – P. 324–333.
16. TORRE G. D. L., YUCELEN T., JOHNSON E. *Constrained Formation Protocols for Networked Multiagent Systems* // International Conference on Unmanned Aircraft Systems. – 2013. – P. 824–830.

17. ZAVLANOS M. M., PAPPAS G. J. *Potential Fields for Maintaining Connectivity of Mobile Networks* // IEEE T. on Robotics. – 2007. – Vol. 23, No.4. – P. 812–816.

## **COLLISION AVOIDANCE ALGORITHM IN THE MULTIAGENT SYSTEM**

**Dmitriy Kazanin**, «Temp-Avia», Arzamas Polytechnical institute, Arzamas, engineer-mathematician, post-graduate student (kazanindk@gmail.com).

*Abstract: A group flight of hypothetical flying machines is considered, during which mutual collisions are possible. A collision avoidance strategy is implemented in the multi-agent system during the formation of the system. This strategy is based on the method of an artificial potential field. Mathematical modeling of the received algorithms is made.*

Keywords: unmanned aerial vehicle, multi-agent system, control system, collision avoidance, artificial potential field.

*Статья представлена к публикации  
членом редакционной коллегии ...*

*Поступила в редакцию ...  
Опубликована ...*