

**В.И. Чепиженко**

## **АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЕВЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ И КОНФЛИКТНЫХ ЗАДАЧ**

Проведена систематизация методов навигации и разрешения конфликтов, основанных на использовании свойств потенциальных силовых полей для различных классов динамических объектов, таких как пилотируемые и беспилотные летательные аппараты, мобильные роботы и автономные подводные транспортные средства.

**Постановка проблемы в общем виде.** Анализ современных тенденций развития динамических систем показывает, что:

– постоянное улучшение характеристик динамических объектов приводит к существенной интенсификации их использования и к расширению диапазонов их применения;

– создание новых классов динамических объектов (беспилотных аппаратов, необитаемых аппаратов, робототехнических систем и т.д.) обуславливает необходимость разработки методов их безопасного взаимодействия с другими объектами и системами в навигационной среде;

– возникают принципиально новые возможности организации среды «обитания» динамических систем, которые определяются внедрением новых организационных и компьютерных технологий (в том числе и глобального управления движением), которые декларируют гибкое, скоординированное, а не регламентированное использование среды с учетом всех ее пользователей.

Это приводит к увеличению количества и принципиальному усложнению конфликтов в среде «обитания» динамических систем и необходимости разработки универсальных и надежных методов их разрешения.

### **Анализ последних исследований и публикаций по данной проблеме.**

Проявление большого интереса ученых к возможности использования физических свойств природы и поведения людей в группах для решения конфликтных задач привело к разработке методов, основанных на использовании свойств сил притяжения и отталкивания, присущих потенциальным силовым полям.

В литературе встречается большое количество названий методов, в основу которых положены свойства потенциальных силовых полей: метод потенциальных полей (Potential Field Approach), метод искусственных потенциальных полей (Artificial Potential Fields), метод полей виртуальных сил (Virtual Force Field), метод гистограмм векторных сил (Vector Field Histogram) и др.

Эти методы разработаны для различных классов динамических объектов, таких как пилотируемые летательные аппараты (Piloted Aircraft), беспилотные летательные аппараты (Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)), колесные мобильные роботы (Wheeled Mobile Robots), автономные подводные транспортные средства (Autonomous Underwater Vehicles (AUVs)).

**Выделение нерешенных прежде частей общей проблемы.** В [1, 2] предпринята попытка классификации потенциальных полевых методов по виду силового поля: однородное, перпендикулярное, тангенциальное,

случайное, притягивающее, отталкивающее, комбинация притягивающего и отталкивающего, мир с каньонной коробкой. Однако такой подход к систематизации методов является формальным, не учитывает свойств физической природы, заложенной в методах и не позволяет системно подойти к их анализу.

**Целью статьи** является систематизация существующих методов, основанных на использовании свойств потенциальных силовых полей, для решения навигационных и конфликтных задач при управлении динамическими объектами.

**Изложение основного материала исследования.** В статье предлагается подход классификации полевых методов на основе использованных в них физических законов и явлений. В соответствии с данным критерием все полевые методы можно разделить на методы, использующие свойства электрических полей, силовых вихревых (векторных) полей и искусственные навигационные функции.

**Использование свойств электрических полей.** Одним из основоположников идеи использования свойств искусственных потенциальных полей в робототехнике для обхода препятствий манипуляторами и мобильными роботами в реальном времени является О. Кхатиб. В своей работе [3] он пишет: «Манипулятор движется в силовом поле. Положение, которое необходимо достичь манипулятору, является притягивающим полюсом для конца исполнительного элемента, а препятствия являются отталкивающими поверхностями для частей манипулятора».

В [3] искусственное потенциальное поле задается потенциалом, который включает элементы притяжения к цели и отталкивания от препятствия соответственно:

$$U(x) = U_{x_d}(x) + U_0(x), \quad (1)$$

$$U_{x_d}(x) = K(x - x_d)^2, \quad (2)$$

$$U_0(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 & \text{если } \rho \leq \rho_0, \\ 0 & \text{если } \rho > \rho_0, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\rho_0$  — зона действия сил в потенциальном поле;  $\rho$  — кратчайшее расстояние до препятствия.

Препятствия описываются совокупностью «примитивов», таких как точка, прямая, плоскость, эллипсоид, параллелепипед, конус и цилиндр. В более общих случаях аппроксимация препятствий производится с помощью  $n$ -эллипсоидов вида

$$\left( \frac{x}{a} \right)^{2n} + \left( \frac{y}{b} \right)^{2n} + \left( \frac{z}{c} \right)^{2n} = 1. \quad (4)$$

Серьезным недостатком подхода является риск местных минимумов и колебаний около препятствий и в узких проходах.

На рис. 1. изображена аппроксимационная поверхность для  $n = 4$ .

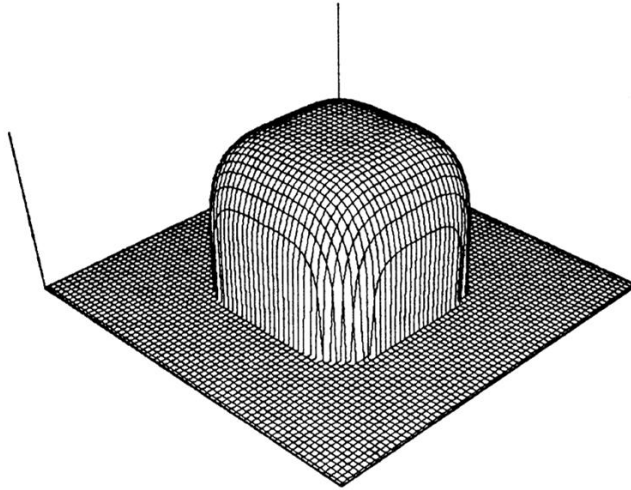


Рис. 1. Аппроксимационная поверхность по методу Кхатиба

В [4] предпринята попытка устранить недостаток метода искусственных силовых полей, который имеет место в случае, когда робот и цель находятся в пределах сил отталкивания, генерируемых препятствием. Для этого функция потенциала отталкивания, соответствующая [3], была преобразована к виду

$$U_0(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \rho^n & \text{если } \rho \leq \rho_0, \\ 0 & \text{если } \rho > \rho_0. \end{cases} \quad (5)$$

Моделирование данной функции показало, что при выборе соответствующих параметров удастся устранить локальные минимумы (рис. 2).

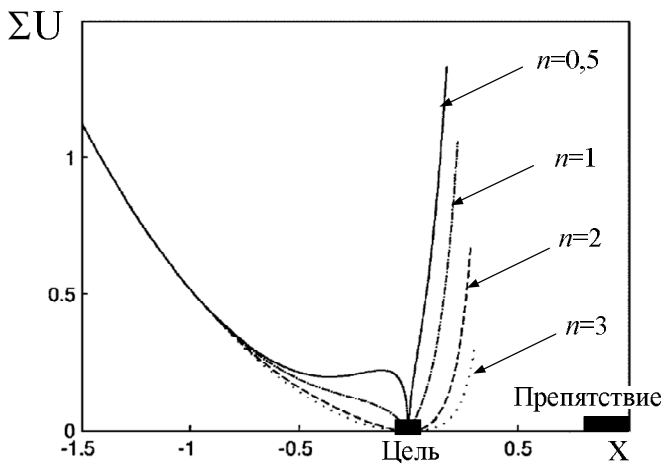


Рис. 2. Устранение локального минимума для случая, когда робот и цель находятся в пределах сил отталкивания от препятствия

В [5] решение конфликта также предлагается искать на основе использования принципа создания искусственных силовых полей. В

соответствии с этим принципом самолет перемещается в области искусственных сил, которые производятся самолетами-нарушителями и пунктами маршрута, соответствующими плану полета. Силы  $\sum_{i=0}^n \mathbf{F}_i$ , создаваемые самолетами-нарушителями, являются отталкивающими, направлены на обеспечение обхода зоны возможного столкновения и возрастают с уменьшением расстояния между самолетами. Силы  $\mathbf{F}_ц$ , создаваемые пунктами маршрута, являются притягивающими. Результирующая сила  $\mathbf{F}_{рез}$  является суммой вышеупомянутых сил и направлена на обеспечение выполнения плана полета, отклонение от маршрута при возникновении конфликтной ситуации и возвращение к плану полета при уменьшении риска столкновения:

$$\mathbf{F}_{рез} = g_i \sum_{i=0}^n \mathbf{F}_i + g_ц \mathbf{F}_ц, \quad (6)$$

где  $g_i, g_ц$  — коэффициенты усиления.

Силы  $\mathbf{F}_i$ , формирующие управляющий сигнал на обход зоны конфликта, являются суммами двух сил: сил непосредственного отталкивания от границы зоны конфликта и сил скольжения и определяются как

$$\mathbf{F}_i = V(\cos(\varphi), \sin(\varphi), 0)^T, \quad (7)$$

$$V = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1}{2} \eta \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2, & \text{если } \rho \leq \rho_0 \\ 0, & \text{если } \rho > \rho_0 \end{array} \right\},$$

$$\varphi = \varphi_ц - \varphi_n,$$

где  $\varphi_ц$  и  $\varphi_n$  — курсовой угол на цель и на самолет-нарушитель;  $\eta$  — константа,  $\rho$  — кратчайшее расстояние до препятствия,  $\rho_0$  — минимальное безопасное расстояние до препятствия.

Сила непосредственного отталкивания направлена по градиенту к линии зоны конфликта, а сила скольжения направлена по касательной к линии зоны конфликта в точке ее пересечения с линией маршрута самолета.

Развитием метода, предложенного в [5], является использование эффекта защитной зоны воздушного пространства самолета (Protected Airspace Zone (PAZ)) для решения конфликта в горизонтальной плоскости [6]. В работе оценивается влияние формы PAZ (цилиндрическая с кругом в основании и цилиндрическая с эллипсом в основании, продольная ось которой направлена по результирующему вектору скорости) на показатели расхождения воздушных судов.

Данный подход отличают следующие особенности:

1. Сила отталкивания назначается не самолету-нарушителю, а всей зоне конфликта.
2. Сила непосредственного отталкивания и сила скольжения имеют различные дистанции действия относительно зоны конфликта.
3. В полуавтоматическом режиме направление силы скольжения определяет пилот.

Недостатками методов, изложенных в [5, 6] являются:

1. Необходимость задавать логические условия переключения сил скольжения и сил отталкивания от зоны конфликта резко усложняет задачу расхождения при множественном конфликте, особенно в полуавтоматическом режиме.

2. Требование согласования действий участниками конфликта усложняется в условиях множественных конфликтов, особенно в случаях разрешения конфликтов на параллельных курсах. В случае участия в конфликтной ситуации беспилотных летательных аппаратов, согласование действий требует автоматизации.

Метод виртуальных силовых полей (VFF), представленный в работе [7], был разработан для обхода препятствий быстрыми мобильными роботами в реальном времени.

Отталкивающая сила от каждой активной точки препятствия формируется с помощью силовой функции вида

$$F_{ij} = \frac{F_{cr} W^n C_{ij}}{d^n(i, j)} \left( \frac{x_i - x_0}{d(i, j)} x + \frac{y_j - y_0}{d(i, j)} y \right), \quad (8)$$

где  $F_{cr}$  — постоянная силы отталкивания;  $d(i, j)$  — расстояние между активной точкой  $(i, j)$  препятствия и роботом;  $C_{ij}$  — оценка достоверности активной точки  $(i, j)$ ;  $W$  — ширина мобильного робота;  $x_0, y_0$  — текущие координаты робота;  $x_i, y_i$  — координаты активной точки  $(i, j)$  препятствия.

Виртуальная притягивающая сила, обеспечивающая движение робота к цели, формируется с помощью функции вида

$$F_t = F_{ct} \left( \frac{x_t - x_0}{d_t} x + \frac{y_t - y_0}{d_t} y \right), \quad (9)$$

где  $F_{ct}$  — постоянная силы притяжения;  $d_t$  — расстояние между целью и роботом;  $x_t, y_t$  — координаты цели.

Результирующий вектор сил  $R$  определяется как сумма сил

$$R = \sum_{ij} F_{ij} + F_t. \quad (10)$$

В контуре управления роботом командный угол поворота определяется как

$$\delta = \operatorname{atan} \left( \frac{F_r - F_{ct} \cos \alpha}{F_{ct} \sin \alpha} \right), \quad (11)$$

где  $\alpha$  — курсовой угол цели.

Синтезированное на основе данного метода управление порождает четыре проблемы, которые ограничивают применение предложенного метода:

1. Возникновение циклического поведения робота, связанного с наличием ловушек, вызванных местными минимумами потенциальных функций.

2. Невозможность пройти между близко расположенными препятствиями.

3. Колебания траектории движения и «топтанье на месте» при обходе препятствий.

4. Колебания траектории движения в узких проходах.

В [8] виртуальные силовые поля генерируются с помощью функций:

— для цели

$$\begin{aligned}U_{ц_x}(x, y) &= K_{ц} \frac{x_G - x}{r}, \\U_{ц_y}(x, y) &= K_{ц} \frac{y_G - y}{r}, \\r &= \sqrt{(x_G - x)^2 + (y_G - y)^2};\end{aligned}\quad (12)$$

— для препятствий

$$\begin{aligned}F_{ix}(x, y) &= -K_i \frac{x_i - x}{(\max\{(r - a_i), b_i\})^2}, \\F_{iy}(x, y) &= -K_i \frac{y_i - y}{(\max\{(r - a_i), b_i\})^2}\end{aligned}\quad (13)$$

где  $r$  — расстояние между роботом и целью или препятствием;  $a_i$  — радиус препятствия;  $b_i$  — относительная высота препятствия.

Проекции полной силы, действующей на робота, задаются выражениями:

$$\begin{aligned}F_x &= F_{G_x} + F_{1x} + F_{2x} \\F_y &= F_{G_y} + F_{1y} + F_{2y}.\end{aligned}\quad (14)$$

Управляющий угол  $\varphi$  формируется как разница между путевым углом  $\theta$  и углом  $\alpha$ , характеризующим направление действия результирующих сил:

$$\varphi = K(\theta - \alpha), \quad \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{F_y}{F_x}\right).\quad (15)$$

Данному методу присущи недостатки, аналогичные [7].

**Использование свойств силовых вихревых (векторных) полей.** Ряд работ посвящен созданию искусственных потенциальных (скоростных) вихревых полей для формирования алгоритмов планирования пути автономных мобильных аппаратов.

В [9] предлагается использовать уравнения Лапласа, основным свойством которого является наличие единственного глобального минимума. Уравнения Лапласа имеют два вида аналитических решений. Первый тип решений представляет безвихревой сток, а второй тип — вихревой исток. Их комбинация позволяет формировать маршруты движения автономных мобильных аппаратов.

В [10] траекторное управление динамическим объектом типа малого беспилотного летательного аппарата синтезируется на основе построения

прямолинейных и круговых траекторий движения с помощью векторных полей. Векторное поле для прямолинейных траекторий задается выражением

$$\chi^c = \chi^f - \chi^e \left( \frac{e}{\tau} \right)^k - \frac{k\chi^e S}{\alpha\tau^k} e^{k-1} \sin \chi, \quad (16)$$

где  $\chi^f$  — угол между направлениями на промежуточные точки маршрута 1 и 2;  $\chi^c$  — командный угол;  $\chi^e$  — угол входа в область перехода;  $e$  — боковая путевая ошибка;  $\tau$  — ширина области перехода;  $k$  — коэффициент усиления;  $S$  — пройденный путь;  $\alpha$  — положительная константа.

Векторное поле для круговых траекторий задается выражением

$$\chi^c = \gamma - \frac{5\pi}{6} + \frac{S}{d} \sin(\chi - \gamma) \text{ при } d \leq 2r, \quad (17)$$

где  $r$  — радиус орбиты;  $d$  — расстояние от центра окружности до динамического объекта.

Сложность формирования траекторий движения в трехмерном пространстве ограничивает применимость данного метода.

В [11] решаются задачи аналогично [10], однако для их решения используется потенциальная функция

$$\Phi(x, y) = \frac{\sigma}{2\pi} \ln \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \quad (18)$$

где  $\sigma$  — сила элемента-источника.

В работе [12] рассматривается алгоритм для навигации робота, основанный на методе искусственного потенциального поля. В данной реализации метода потенциалов робот представляется как точка начала отсчета в полярных координатах, из которой вращающимся сенсором осуществляется непрерывное циклическое сканирование местности с сектором обзора  $360^\circ$ . На каждом шаге сканирования с помощью уравнений для искусственного потенциального поля вычисляется вектор силы  $f_i$ :

$$f_i = \frac{A}{d_i^2}; \arg(f_i) = \arg(d_i) + \pi, \quad (19)$$

где  $A$  — фиксированная константа;  $d_i$  — результат  $i$ -го замера дальности от робота до препятствия.

После обзора всего сектора ( $360^\circ$ ) определяются новые компоненты вектора скорости  $V_x$  и  $V_y$ :

$$\begin{aligned} V_y &= \sum_{i=0}^{2\pi/\varphi} \beta^{(2(2\pi/\varphi)-i)} f_i \cos(i\gamma), \\ V_x &= \sum_{i=0}^{2\pi/\varphi} \beta^{(2(2\pi/\varphi)-i)} f_i \sin(i\gamma), \end{aligned} \quad (20)$$

где  $\beta$  — весовой множитель, используемый для того, чтобы на компоненты скорости большее влияние оказывали силы, действующие с фронта робота, чем с задней стороны;  $\gamma$  — угловой шаг сканирования.

Далее вычисляется направление движения в полярных координатах,  $\theta_{\text{free}}$ , и соответствующий ему сектор  $k_{\text{free}}$  в  $H$ . Алгоритм выбирает более проходимое направление и, вместе с тем, как можно более приближенное к текущему направлению на цель  $\theta_{\text{targ}}$ .

Аналогичный [12] подход к построению вихревых полей предложен в [13].

В [14] для формирования роя беспилотного летательного аппарата используются искусственные потенциальные области, произведенные от экспоненциальных и сигмоидальных функций.

**Искусственные навигационные функции.** В [15] предложено использовать в законе управления самолетом сигнал биполярной навигационной функции [16], которая была синтезирована на основе свойств искусственных потенциальных полей (рис. 3).

$$\Phi_i = \frac{\gamma_{di} + f_i}{\left( (\gamma_{di} + f_i)^k + H_i G_i \beta_{0i} \right)^{1/k}}, \quad (21)$$

где  $H_n$  — величина отталкивающего потенциала, зависящая от расстояние до искусственного препятствия;  $G_i$  — мера близости к зоне конфликта;  $\beta_{0i}$  — мера рабочего пространства, в рамках которого данная навигационная функция существует;  $\gamma_{di}$  — расстояние агента до цели назначения;  $f_i$  — функция, гарантирующая положительность значения  $\Phi_i$  даже при достижении агентом своей цели;  $k$  — положительный настраиваемый параметр для конкретной навигационной функции.

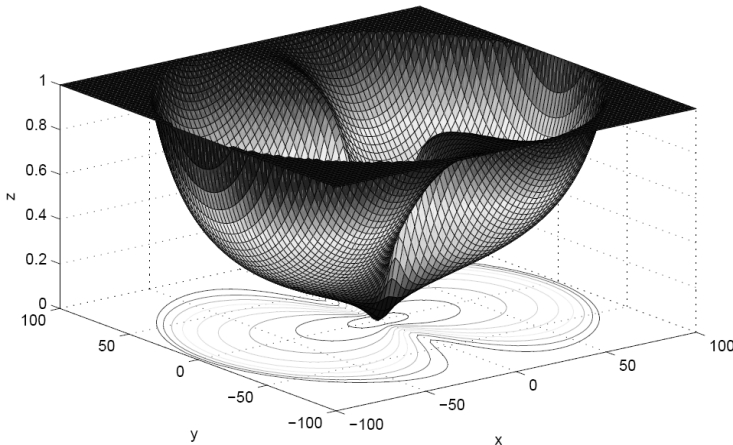


Рис. 3 Внешний вид навигационной функции (21) для 2-мерного случая

Сложность формирования навигационной функции ограничивает применение данного метода для разрешения конфликтов большой размерности.



## Выводы

Анализ приведенных выше потенциальных полевых методов показывает следующее:

— многие авторы, хотя и декларируют использование свойств потенциальных силовых полей, однако переносят на модели лишь схожие свойства, основанные на гидродинамических функциях, искусственных социальных функциях, искусственных навигационных функциях, эмпирических математических функциях и геометрических расчетах;

— особенностью имплементации потенциальных полевых методов в робототехнике является то, что эти методы используются в основном для решения локальных задач навигации, формирования маршрута движения и обхода статических препятствий;

— ограниченное использование свойств потенциальных силовых полей в методах разрешения конфликтов для авиации определяется наличием у потенциальных функций глобального минимума, что приводит к невозможности реализации полученных траекторий движения («топтанье на месте», «биение траектории вблизи препятствий и в узких проходах» и т.д.);

— общим недостатком потенциальных полевых методов являются большие временные и вычислительные затраты на определение градиента вблизи особых точек (минимумов и разрывов функций);

— потенциальные функции генерируются исходя из эмпирических знаний или на основе здравого смысла, не опираются на единую системную концепцию разрешения конфликтов в навигационной динамической среде.

1. Goodrich M.A. Potential Fields Tutorial. — [http://borg.cc.gatech.edu/ipr/files/goodrich\\_potential\\_fields.pdf](http://borg.cc.gatech.edu/ipr/files/goodrich_potential_fields.pdf).
2. Safadi H. Local Path Planning Using Virtual Potential Field // McGill University School of Computer Science, 2007. — <http://www.cs.mcgill.ca/~hsafad/robotics/index.html>.
3. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots // The International Journal of Robotics Research. — 1986. — Vol. 5 (1). — P. 90–98.
4. Howard A., Mataric M.J., Sukhatme G.S. Mobile sensor network deployment using potential fields: a distributed, scalable solution to the area coverage // Proceedings of the 6th International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems (DARS02), Fukuoka, Japan, June 25–27. — 2002. — P.113–126.
5. Duong V. N., Zeghal K. Conflict resolution advisory for autonomous airborne separation in low-density airspace // 36th IEEE Conference on Decision and Control, San Diego, Ca, USA, Dec 10 — 12, 1997. — P. 13–18.
6. Barraci N, Klingauf U. Effect of Protection Zone Geometry on Traffic Conflict Resolution based on Artificial Force Fields. — <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/38719>.
7. Koren Y., Borenstein J. Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation // IEEE Conference on Robotics and Automation, Sacramento, CA, April 1991. — P. 1398–1404.
8. Stingu P.E., Lewis F.L. Motion path planning for mobile robots. — <http://arri.uta.edu/acs/ee5322/lectures/Motion%20path%20planning.pdf>.
9. McInnes C.R. Velocity field path-planning for single and multiple unmanned aerial vehicles // The Aeronautical Journal. — July 2003. — P. 419–426.
10. Nelson D. R., Barber D. B., McLain T. W., Beard R. W. Vector Field Path Following for Small Unmanned Air Vehicles // Proceedings of the 2006 American Control Conference, Minneapolis, June 2006. — P. 5788–5794.
11. Uzol O., Yavrucuk I., Sezer-Uzol N. Collaborative Target Tracking for Swarming MAVs Using Potential Fields and Panel Methods // AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Honolulu, Hawaii, Aug 18-21, 2008 — P. 1–8.

12. Adams M.D., Hu Huosheng, Probert P.J. Towards a real-time architecture for obstacle avoidance and path planning in mobile robots // *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation Proceedings*, Cincinnati, OH, USA, 13–18 May 1990. — P. 584–589.
13. Masoud A.A. Decentralized self-organizing potential field-based control for individually motivated mobile agents in a cluttered environment: A Vector-Harmonic Potential Field Approach // *IEEE transactions on systems, man and cybernetics*. — Part A: Systems and Humans, May 2007. — Vol. 37(3). — P. 372–390.
14. Barnes L., Fields M., Valavanis K. Unmanned Ground Vehicle Swarm Formation Control Using Potential Fields // *IEEE 15th Mediterranean conference on control and automation*, Athens, Greece, 2007. — P. 1–8.
15. Roussos G. P., Dimarogonas D. V., Kyriakopoulos K. J. Distributed 3D Navigation and Collision Avoidance for Nonholonomic Aircraft-like Vehicles. — [http://www.s3.kth.se/~dimos/GRoussos\\_ACSP.pdf](http://www.s3.kth.se/~dimos/GRoussos_ACSP.pdf).
16. Tanner H. G., Kyriakopoulos K. J. Nonholonomic motion planning for mobile manipulators // *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, San Francisco, April 2000. — P. 1233–1238.

Национальный авиационный университет, Киев

Получено 08.11.2011