

Управление поворотами мобильного робота, подобного автомобилю

А.Э.А. Кабалан¹, А.Р. Гайдук¹ ✉, Н. Абу Хамдан¹

¹ Южный федеральный университет, Институт радиотехнических систем и управления
пер. Некрасовский, д. 44, г. Таганрог 347922, Российская Федерация

✉ e-mail: gaiduk_2003@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Целью данной работы является решение задачи синтеза подсистемы автоматического управления поворотами автономного, мобильного робота, подобного автомобилю (авторобота). Основная сложность решения этой задачи обусловлена неаддитивностью по управлению нелинейной математической модели, описывающей изменения направления движения авторобота.

Методы. Решение задачи получено на основе нового алгебраического полиномиально-матричного метода синтеза с применением квазилинейной модели. Предложенный подход позволяет получить аналитическое решение задачи синтеза систем управления, в том числе, и нелинейными неаддитивными объектами. Квазилинейная модель авторобота построена на основе нелинейных уравнений в переменных состояния.

Результаты. В данной статье показана возможность решения задачи синтеза дискретных систем управления неаддитивными нелинейными объектами. На основе нелинейных уравнений, описывающих повороты авторобота, которые являются неаддитивными по управлению, получена соответствующая квазилинейная модель. На основе этой модели синтезирована дискретная система управления поворотами автономного авторобота. Результаты компьютерного моделирования подтверждают работоспособность системы управления поворотами авторобота в автономном режиме.

Заключение. В работе синтезирована подсистема управления поворотами авторобота, которая обеспечивает требуемые изменения направления его движения, заданные некоторой временной программой. Показано, что алгебраический полиномиально-матричный метод синтеза систем управления с применением квазилинейных моделей позволяет синтезировать дискретные системы управления неаддитивными по управлению объектами. Для построения квазилинейных моделей нелинейных объектов необходимо, чтобы нелинейности объектов были дифференцируемыми по всем своим аргументам.

Ключевые слова: автономный авторобот; квазилинейная модель; поворот; курс авторобота; система управления.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Кабалан А.Э.А., Гайдук А.Р., Абу Хамдан Н. Управление поворотами мобильного робота, подобного автомобилю // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): 134-144. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-134-144>.

Поступила в редакцию 14.09.2021

Подписана в печать 07.10.2021

Опубликована 20.12.2021

Controlling the Turning of a Mobile Car-like Robot

A.E.A. Kabalan¹, Anatoliy R. Gaiduk¹ ✉, N.A. Hamdan¹

² Southern Federal University
44 Nekrasovsky Lane, Taganrog 347922, Russian Federation

✉ e-mail: gaiduk_2003@mail.ru

Abstract

Purpose of research is to solve the problem of the development of the subsystem of automatic control of turnings of an autonomous, mobile car-like robot (autorobot). The main difficulty of solving this problem is due to the non-additivity of the control of nonlinear mathematical model describing changes of autorobot movement direction.

Methods. The solution of the problem is obtained on the basis of a new algebraic polynomial-matrix synthesis method using a quasi-linear model. The proposed approach makes it possible to obtain an analytical solution to the problem of synthesis of control systems, including nonlinear non-additive objects. The quasi-linear model of the autorobot is based on nonlinear equations in state variables.

Results. This article shows the possibility of solving the problem of synthesis of discrete control systems for non-additive nonlinear objects. On the basis of nonlinear equations describing the robot turning which are non-additive in control, a corresponding quasi-linear model is obtained. Based on this model, a discrete turning control system of an autonomous robot was developed. The results of computer modeling confirm the operability of the autorobot's turning control system in offline mode.

Conclusion. A subsystem for controlling turnings of an autorobot, which provides the required changes in the direction of its movement, set by a certain time program is developed. It is shown that the algebraic polynomial-matrix method for the synthesis of control systems using quasi-linear models makes it possible to synthesize discrete control systems with non-additive control objects. To construct quasi-linear models of nonlinear objects, it is necessary for the nonlinearities of objects to be differentiable in all their arguments.

Keywords: autonomous autorobot; quasi-linear model; turning; autorobot's route; control system.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Kabalan A.E.A., Gaiduk A.R., Hamdan N.A. Controlling the Turning of a Mobile Car-like Robot. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(4): 134-144 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-134-144>.

Received 14.09.2021

Accepted 07.10.2021

Published 20.12.2021

Введение

Проблема управления движением мобильных роботов, управление поворотами которых осуществляется аналогично автомобильному, рассматривалась многими исследователями [1-9]. На начальных этапах большое внимание уделялось разработке кинематиче-

ских контроллеров, поскольку автороботы чаще всего эксплуатировались на плоских участках. Так в работе [4] был создан адаптивный кинематический контроллер для управления телекамерой, используемой для отслеживания движущихся целей с использованием обратной связи по изображениям.

Однако в последнее время автороботы все чаще применяются для выполнения различных задач, таких как географические исследования, аварийно-спасательные, сельскохозяйственные работы и др. Требуется выполнение работ с высокой скоростью, а роботы все чаще имеют значительную массу. Поэтому современные исследования посвящены решению сложных задач разработки динамических систем управления автономными роботами [1, 2, 5-10]. Для этой цели применяются различные подходы. В работе [7] разработан алгоритм управления задней парковкой авторобота на основе нечеткой логики и проведено его моделирование. Здесь для получения команды управления углом поворота рулевых передних колес на каждом шаге управления используются операции фаззификации и дефаззификации с применением четырех нечетких правил. Однако в результате моделирования установлено, что столь простой контроллер не позволяет получить качественное управление мобильным роботом. Даксвангер и Шмидт для этой же цели использовали нечеткий и нейросетевой подход с визуальным контролем и автоматическим управлением направлением движения [8].

При создании системы управления автороботом сельскохозяйственного назначения в работе [9] разработаны и кинематическая, и динамическая математические модели, описывающие его движения по некоторой траектории, которая задается в глобальной системе координат.

На основе этих моделей с применением метода функций Ляпунова разработан закон нелинейного динамического управления формацией мобильных автороботов. Этот закон определяет необходимые изменения скорости и углов поворота для обеспечения движения формации автороботов по заданной траектории. В работе [10] синтез системы управления комбайном, предназначенным для уборки сельскохозяйственных культур, применялся метод синтеза систем, селективно инвариантных к внешним воздействиям.

Однако указанные выше методы являются довольно сложными и требуют значительных временных и материальных затрат как при синтезе систем управления, так и при технической реализации соответствующих контроллеров. Целью данной статьи является разработка квазилинейной модели поворотов авторобота, а также синтез дискретной подсистемы автоматического управления поворотами и её исследование. Математическая модель разрабатывается с учетом момента сопротивления повороту, а подсистема управления синтезируется с использованием нового алгебраического полиномиально-матричного метода синтеза нелинейных систем управления на основе полученной квазилинейной модели поворотов авторобота.

Материалы и методы

Полная математическая модель авторобота, описывающая все его движения на некоторой поверхности, получе-

на в работах [11, 12] на основе нелинейной модели мобильного робота, представленной в [13]. Последняя разработана без учета сил сопротивления как прямолинейному движению, так и поворотам робота. Подсистема управления скоростью движения рассматриваемого авторобота разработана в [12].

В соответствии с этой же работой канал управления изменениями направления движения (поворотами) рассматриваемого авторобота описывается следующей системой уравнений в переменных состояниях:

$$\dot{x}_2 = x_3, \quad (1)$$

$$\dot{x}_3 = -cx_3 + M_2 \sin(u_2) / 2I_g, \quad \varphi = x_2, \quad (2)$$

где x_2 – угол наклона продольной оси авторобота к оси Ох системы координат, т.е. x_2 – это угол поворота φ (рис. 1); x_3 – угловая скорость поворота авторобота вокруг его вертикальной оси, проходящей через центр тяжести g ; M_2 – вращающий момент, возникающий при отклонении передних рулевых колес на некоторый угол δ ; u_2 – управление поворотом. В данном случае этим управлением является угол δ ; cx_3 – момент вязкого сопротивления, пропорциональный угловой скорости поворота авторобота; I_g – момент инерции авторобота относительно вертикальной оси.

Проблема управления поворотами рассматриваемого авторобота осложняется тем, что его соответствующий канал управления является неаддитивным по управлению. Действительно, соглас-

но (2), управление u_2 входит в это уравнение нелинейно.

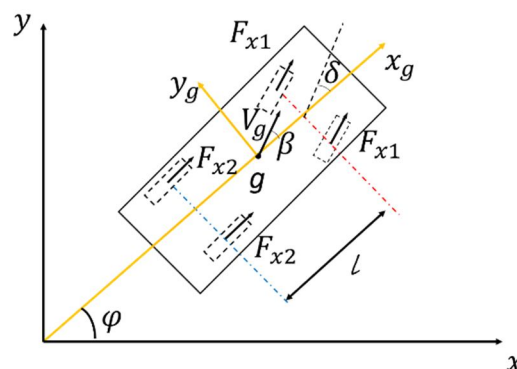


Рис. 1. Мобильный авторобот

Fig. 1. Mobile autorobot

Для преодоления этой сложности в данной работе предлагается использовать, предложенный алгебраический полиномиально-матричный (АПМ) метод синтеза систем автоматического управления (САУ) [12]. Помимо своей простоты и аналитического характера, этот метод позволяет решить задачу синтеза САУ как для аддитивных, так и для неаддитивных по управлению нелинейных объектов. Покажем эту возможность на примере решения рассматриваемой задачи.

Квазилинейная модель уравнений (1) и (2) в векторно-матричной форме имеет вид

$$\dot{\tilde{x}} = A(\tilde{x})\tilde{x} + b(u_2)u_2, \quad \varphi = [1 \quad 0]\tilde{x}, \quad (3)$$

где $\tilde{x} = [x_2 \quad x_3]^T$ – вектор состояния канала управления поворотами авторобота;

$$A(\tilde{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -c \end{bmatrix}, \quad b(u_2) = \begin{bmatrix} 0 \\ b_2(u_2) \end{bmatrix},$$

$$b_2(u_2) = a_2 u_2^{-1} \sin(u_2), \quad (4)$$

$$a_2 = M_2 / 2I_g.$$

При синтезе САУ АПМ методом искомого управления также описывается квазилинейной моделью следующего вида:

$$u_2 = k_0(\tilde{x}, u_2)\varphi^* - k^T(\tilde{x}, u_2)\tilde{x}, \quad (5)$$

где $k(\tilde{x}, u_2) = [k_1(\tilde{x}, u_2) \ k_2(\tilde{x}, u_2)]^T$ – функциональный вектор, а $k_0(\tilde{x}, u_2)$ – коэффициент, также зависящий в общем случае от переменных системы; φ^* – заданные значения угла поворота автобробота. При управлении (5) замкнутая система (3), (4), (5) описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} &= D(\tilde{x}, u_2)\tilde{x} + k_0(\tilde{x}, u_2)b(u_2)\varphi^*, \\ \varphi &= [1 \ 0]\tilde{x}, \end{aligned} \quad (6)$$

где матрица

$$D(\tilde{x}, u_2) = A(\tilde{x}) - b(u_2) \cdot k^T(\tilde{x}, u_2). \quad (7)$$

Характеристический полином $D(p, \tilde{x}, u_2) = \det(pE - D(\tilde{x}, u_2))$ матрицы (7) может быть представлен [15, 16] в виде суммы полиномов:

$$D(p, \tilde{x}, u_2) = A(p, \tilde{x}) + \sum_{i=1}^n k_i(\tilde{x}, u_2)V_i(p, \tilde{x}, u_2) \quad (8)$$

где

$$A(p, \tilde{x}) = \det(pE - A(\tilde{x})) = p^2 + cp, \quad (9)$$

$$V_i(p, \tilde{x}, u_2) = e_i \cdot \text{adj}(pE - A(\tilde{x})) \cdot b(u_2), \quad (10)$$

$i = 1, 2$.

Здесь e_i – i -я строка единичной матрицы E ; $\text{adj}(\cdot)$ – присоединенная матрица [17]. По формуле (10), с учетом (4), находятся полиномы:

$$\begin{aligned} V_1(p, u_2) &= b_2(u_2), \\ V_2(p, u_2) &= b_2(u_2)p. \end{aligned} \quad (11)$$

Для обеспечения устойчивости синтезируемой системы формируется гурвицевый полином:

$$D^*(p) = p^2 + \delta_1 p + \delta_0 \text{ второй степени,}$$

так как $n = 2$, и подставляется в (8) вместо полинома $D(p, \tilde{x}, u_2)$. Полиномы $D^*(p)$ и $A(p, \tilde{x})$ можно считать известными, поэтому, перенеся в (8) полином $A(p, \tilde{x})$ в левую часть, получаем, что сумма в правой части (8), содержащая искомые коэффициенты $k_i(\tilde{x}, u_2)$ удовлетворяет равенству

$$\sum_{i=1}^n k_i(\tilde{x}, u_2)V_i(p, \tilde{x}, u_2) = R(p, \tilde{x}, u_2), \quad (12)$$

где полином $R(p, \tilde{x}, u_2)$ равен разности известных полиномов:

$$\begin{aligned} R(p, x) &= D^*(p) - A(p, x) = \\ &= p^2 + \delta_1 p + \delta_0 - (p^2 + cp) = \\ &= (\delta_1 - c)p + \delta_0. \end{aligned} \quad (13)$$

Приравнявая коэффициенты в левой и в правой частях (12) с учетом выражений (11) и (13), получим систему n алгебраических уравнений, которая в данном случае имеет вид:

$$\begin{bmatrix} b_2(u_2) & 0 \\ 0 & b_2(u_2) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_0 \\ (\delta_1 - c) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Решение системы (14) позволяет записать выражения для искоемых коэффициентов $k_i(u_2)$ из управления (5):

$$k_1(u_2) = \frac{\delta_0}{b_2(u_2)}, \quad k_2(u_2) = \frac{\delta_1 - c}{b_2(u_2)}. \quad (15)$$

Подставляя полученные выражения для коэффициентов $k_i(u_2)$ в равенство (7), будем иметь:

$$\begin{aligned} D(\tilde{x}, u_2) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_1 b_2(u_2) & -c - k_2 b_2(u_2) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\delta_0 & -\delta_1 \end{bmatrix} = D_c; \end{aligned} \quad (16)$$

Затем, подставляя результирующую матрицу $D(\tilde{x}, u_2) = D_c$ в (6), получим

$$\dot{\tilde{x}} = D_c \tilde{x} + b(u_2)k_0(u_2)\varphi^*, \quad \varphi = [1 \ 0]\tilde{x}. \quad (17)$$

Полученные уравнения (17) являются квазилинейной моделью замкнутой подсистемы канала управления поворотом авторобота. В данном случае системная матрица оказалась постоянной, а её характеристический полином удовлетворяет критерию Гурвица. Поэтому подсистема (17) является асимптотически устойчивой.

Для определения коэффициента $k_0(u_2)$ из управления (5) и уравнения (17), рассмотрим установившийся режим подсистемы (17), который существует в силу её устойчивости. В этом режиме при $\varphi^* = \varphi_0^* 1(t)$ и $t \gg 0$ производная $\dot{\tilde{x}} = 0$, вектор $\tilde{x} = \tilde{x}^0 = \text{const}$, управление $u = u_2^0$, а выход системы $\varphi^0 = c^T \tilde{x}^0$. Поэтому при $t \gg 0$ уравнение (17) принимает вид

$$0 = D_c \tilde{x}^0 + b(u_2^0)k_0(u_2^0)\varphi_0^*, \quad (18)$$

$$\varphi^0 = [1 \ 0]\tilde{x}^0.$$

Детерминант матрицы D_c не равен нулю, так как она устойчива, поэтому из (18) и условия $\varphi^0 = \varphi^*$ следует равенство

$$k_0(u_2^0) = \frac{\delta_0}{b_2(u_2^0)}. \quad (19)$$

Полученное выражение позволяет по (5) записать искомое управление поворотом авторобота

$$u_2 = \frac{u_2}{a_2 \sin(u_2)} \times (\delta_0(\varphi_0^* - x_2) - (\delta_1 - c)x_3). \quad (20)$$

На практике при непрерывной реализации управления воспользоваться выражением (20) невозможно, так как управление u_2 содержится и в левой и в правой части этого выражения. Эта сложность легко преодолевается при дискретной, цифровой реализации полученной подсистемы управления. Если выражение (19) подставить в (17) и промоделировать при малом значении шага интегрирования (порядка $dt = 0,02$), то можно установить, что значения управления $u_{2,k-1}$ и $u_{2,k}$, вычисляемые по выражению (20) очень близки друг к другу. Это позволяет при использовании цифровых средств управления, например, микроконтроллера, выражение (20) представить следующим образом:

$$u_{2,k+1} = \frac{u_{2,k}}{a_2 \sin(u_{2,k})} \times (\delta_0(\varphi_0^* - x_{2,k}) - (\delta_1 - c)x_{3,k}) \\ k = 1, 2, 3, \dots \quad (21)$$

Указанная замена вносит некоторые отклонения реального процесса управления от расчетного, но эти отклонения при малых T чрезвычайно малы и подавляются системой управления, так как она является устойчивой.

Результаты и их обсуждение

С целью исследования процесса управления объектом (1), (2) дискретным управлением (21), проведено компьютерное моделирование этой подсистемы в MATLAB при следующих значениях параметров: $M_2 = 2690$ Нм; $I_g = 1800$ Нмс²/рад; $c = 0,05$ с⁻¹; $\delta_0 = 2$, $\delta_1 = 3$ и $dt = 0,02$; $u_0 = 0,5$. Программа измене-

ния заданного угла поворота φ (курса) авторобота представлена на рис. 2,а. На рис. 2,б приведён график изменения угла поворота авторобота, полученный в результате моделирования подсистемы (1), (2), (21). При этом скорость изменения заданных значений угла φ была ограничена значением 2 рад/с.

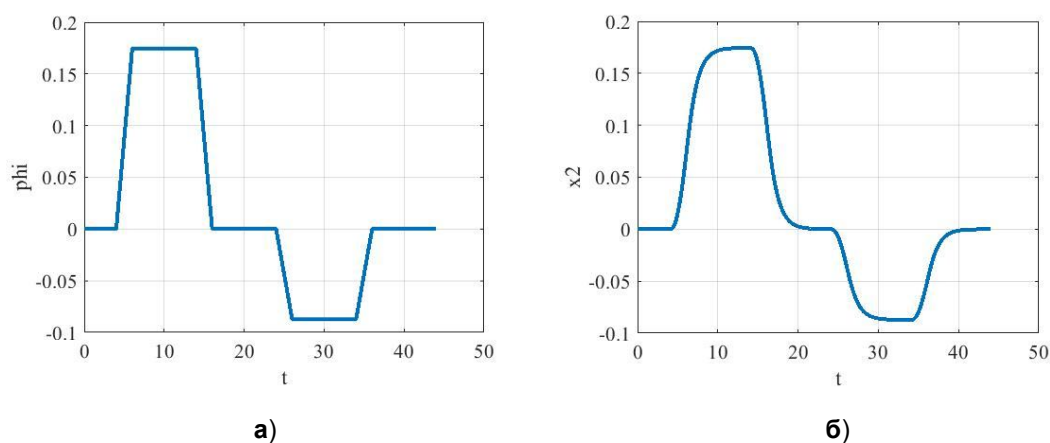


Рис. 2. Изменение направления движения авторобота:

а – программа курса; **б** – реальные изменения курса авторобота

Fig. 2. Changes of autorobot direction of motion: **a** – route program; **b** – actual changes of autorobot route

Как видно из графиков, длительность переходных процессов при изменении направления движения авторобота около 6 секунд, а установившиеся значения углов поворота соответствуют заданным значениям.

На рис. 2,а представлен график изменения управления u_2 , которым является, как отмечалось выше, угол поворота рулевых колес. Значения этого угла также ограничены и лежат в допустимом диапазоне; при этом знаки углов поворота рулевых колес в момент начала поворота совпадают с заданным изменением направления движения. Однако для обеспечения движения ав-

торобота в некотором направлении рулевые колеса поворачиваются подсистемой управления поворотами в двух противоположных направлениях.

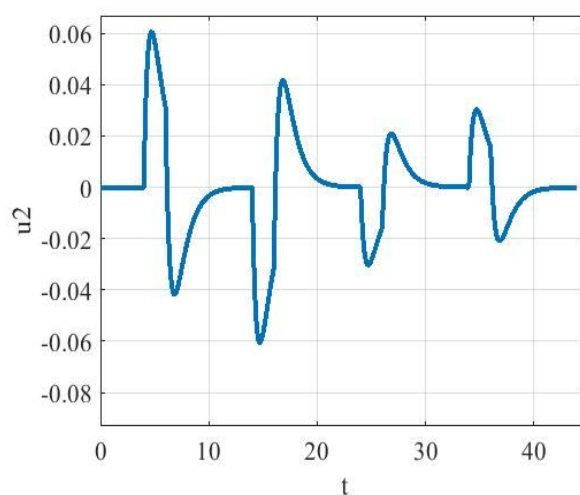


Рис. 3. Управление автороботом

Fig. 3. Autorobot control**Выводы**

В работе предложен алгебраический полиномиально-матричный метод синтеза систем управления с применением квазилинейных моделей, который позволяет синтезировать непрерывные системы управления нелинейными, ад-

дитивными по управлению объектами и дискретные системы управления неаддитивными по управлению объектами.

Предложенным методом решена задача синтеза подсистемы управления поворотами авторобота, которая обеспечивает его движение по траектории, заданной временной программой.

Список литературы

1. Wang B., Qian C., Chen Q. A Dynamics Controller Design Method for Car-like Mobile Robot Formation Control // MATEC Web of Conferences (EECR 2018). Vol. 160, Article No. 06003.
2. Sayyaadi H., Kouhi H., Salarieh H. Control of car-like (wheeled) multi robots for following and hunting a moving target // Scientia Iranica. 2011. Vol. 18. Is. 4. P. 950-965.
3. Синтез системы управления движением группы мобильных роботов в условиях неопределенности / А.Р. Гайдук, И.А. Каляев, С.Г. Капустян, И.О. Шаповалов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018; 22(4): 112-122. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-4-112-122>.
4. Chen X., Jia Y., Adaptive leader-follower formation control of non-holonomic mobile robots using active vision // IET Control Theory Applications. 2015. Vol. 9. Iss. 8. P. 1302-1311.
5. Разработка конструкции шагающего робота ANYWALKER / И.В. Рядчиков, С.И. Сеченев, А.А. Свидлов, А.Э. Бирюк, А.С. Прутский, А.А. Гусев, Е.В. Никульчев. М., 2019. С. 1215-1219.
6. Egerstedt M., Hu X., Stotsky A. Control of a car-like robot using a virtual vehicle approach // Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control. 1998. Vol. 2. P. 1502-1507.
7. Huang S-J, Lin G-Y. Parallel auto-parking of a model vehicle using a self-organizing fuzzy controller // Proceedings IMechE. 2010. Vol. 224. P. 997-1012.
8. Daxwanger W.A., Schmidt G.K. Skill-Based Visual Parking Control Using Neural and Fuzzy Networks // IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century. 1995. Vol. 2. P. 1659-1664.
9. Hameed A. Intelligent Coverage Path Planning for Agricultural Robots and Autonomous Machines on Three-Dimensional Terrain // J. Intell. Robot Syst. 2014. Vol. 74. P. 965-983.
10. Gaiduk A., Medvedev M., Pshikhov V. Selectively Invariant Control Systems Design of the Unmanned Mobile Robots' Movement // International Conference on Electrical,

Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Mauritius, 2021. Article No. 10. P. 1-5.

11. Кабалан А.Э.А., Гайдук А.Р. Построение квазилинейной модели мобильного робота на основе CGA-модели // Проблемы автоматизации. Региональное управление. Связь и автоматика (ПАРУСА-2019): сборник трудов VIII Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (Геленджик, 6– 8 ноября): в 2 т. / Южный федеральный университет; сост. Ю.Б. Щемелева, С.В. Кирильчик. Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2019. Т. 1. С. 91-95.

12. Кабалан А.Э.А., Гайдук А.Р. Преобразование модели автономного робота // Математические методы в технологиях и технике. Научный журнал. 2021. Т. 7. С. 27-30.

13. Sharma B., Vanualailai J., Chand U. Flocking of Multi-agents in Constrained Environments // European Journal of Pure and Applied Mathematics. 2009. Vol. 2. No. 3. P. 401-425.

14. Gaiduk A.R., Stojković N.M., Plaksienko E.A. Analytical design of nonlinear control systems // FACTA UNIVERSITATIS. Series: Automatic Control and Robotics. 2016. Vol. 13, No. 4. P. 61-68.

15. Гайдук А.Р. Непрерывные и дискретные динамические системы. М.: УМ и ИЦ «Учебная литература», 2004. 252 с.

16. Гайдук А.Р. К синтезу квазилинейных гурвицевых систем управления // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18(3). С. 678-705.

17. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 1988. 552 с.

References

1. Wang B., Qian C., Chen Q. A Dynamics Controller Design Method for Car-like Mobile Robot Formation Control. *MATEC Web of Conferences (EECR 2018)*, vol. 160, Article No. 06003.

2. Sayyaadi H., Kouhi H., Salarieh H. Control of car-like (wheeled) multi robots for following and hunting a moving target. *Scientia Iranica*, 2011, vol. 18, is. 4, pp. 950-965.

3. Gaiduk A.R., Kalyaev I.A., Kapustyan S.G., Shapovalov I.O. Sintez sistemy upravleniya dvizheniem gruppy mobil'nykh robotov v usloviyakh neopredelennosti [Design of the Control System by Movement of Robots Mobile Group in Conditions of Uncertainty]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 4(79), pp. 112-122 <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-4-112-122>. (in Russ.).

4. Chen X., Jia Y. Adaptive leader-follower formation control of non-holonomic mobile robots using active vision. *IET Control Theory Applications*, 2015, vol. 9, is. 8, pp. 1302-1311.

5. Ryadchikov I.V., Sechenov S.I., Svidlov A.A., Biryuk A. E., Prutskiy A. S., Gusev A.A., Nikulchev E.V. *Razrabotka konstruktсии shagayushchego robota ANYWALKER* [Development of a design of the walking robot ANY-WALKER]. Moscow, 2019, pp. 1215-1219.

6. Egerstedt M., Hu X., Stotsky A. Control of a car-like robot using a virtual vehicle approach. *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control*, 1998, vol. 2, pp. 1502-1507.

7. Huang S-J, Lin G-Y. Parallel auto-parking of a model vehicle using a self-organizing fuzzy controller. *Proceedings IMechE*, 2010, vol. 224, pp. 997-1012.

8. Daxwanger W.A., Schmidt G.K. Skill-Based Visual Parking Control Using Neural and Fuzzy Networks. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century*, 1995, vol. 2, pp. 1659-1664.

9. Hameed A. Intelligent Coverage Path Planning for Agricultural Robots and Autonomous Machines on Three-Dimensional Terrain. *J. Intell. Robot Syst*, 2014, vol. 74, pp. 965-983.

10. Gaiduk A., Medvedev M., Pshikhov V. Selectively Invariant Control Systems Design of the Unmanned Mobile Robots' Movement. *International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*, Mauritius, 2021, Article, No. 10, pp. 1-5.

11. Kabalan A.E.A., Gaiduk A.R. [Constriction of quasilinear model of the mobile robot on the basis of CGA model]. *Sbornik trudov VIII Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [Automation Problems. Regional management. Communication and automatic equipment (PARUSA-2019). Collection of works VIII of the All-Russian scientific conference of young scientists, graduate students and students]. Rostov-na-Donu; Taganrog, 2019, vol. 1, pp. 91-95.

12. Kabalan A.E.A., Gaiduk A.R. Preobrazovanie modeli avtonomnogo robota [Model conversation of autonomous robot]. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike* *Mathematical Methods in Technologies and Technique*, 2021, vol. 7, pp. 27-30.

13. Sharma B., Vanualailai J., Chand U. Flocking of Multi-agents in Constrained Environments. *European Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2009, vol. 2, no. 3, pp. 401-425.

14. Gaiduk A.R., Stojković N.M., Plaksienko E.A. Analytical design of nonlinear control systems. *FACTA UNIVERSITATIS. Series: Automatic Control and Robotics*, 2016, vol. 13, no. 4, pp. 61-68.

15. Gaiduk A.R. *Nepreryvnye i diskretnye dinamicheskie sistemy* [Continuous and Discrete in Time Dynamic Systems]. Moscow, 2004, 252 p.

16. Gaiduk A.R. K sintezu kvazilineinykh gurvitsevykh sistem upravleniya [To Design of Quasilinear Hurwitz Control Systems]. *Trudy SPIIRAN = Works of SPIIRAN*, 2019, vol. 18(3), pp. 678-705.

17. Gantmakher F.R. *Teoriya matrits* [Theory of matrixes]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 552 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Кабалан А.Э.А., аспирант, Южный федеральный университет, Институт радиотехнических систем и управления, г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: ali.kabalan.92@gmail.com

A.E.A. Kabalan, Post-Graduate Student, Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation, e-mail: ali.kabalan.92@gmail.com

Гайдук Анатолий Романович, профессор, Южный федеральный университет, Институт радиотехнических систем и управления, г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: gaiduk_2003@mail.ru

Anatoliy R. Gaiduk, Professor, Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation, e-mail: gaiduk_2003@mail.ru

Абу Хамдан Н., аспирант, Южный федеральный университет, Институт радиотехнических систем и управления, г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: dr.nizar.abou.hamdane@gmail.com

N.A. Hamdan, Post-Graduate Student, Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation, e-mail: dr.niar.abou.hamdane@gmail.com