

А. Р. Гайдук, д-р техн. наук, проф., gaiduk_2003@mail.ru, Д. С. Лукин, аспирант, dlukin@sfnu.ru, ФГАОУ ВО Южный федеральный университет, г. Таганрог

Синтез нелинейных систем управления автороботами

В настоящее время роботы различных типов все шире применяются для решения различных задач. Чаще всего это мобильные роботы, перемещающиеся по поверхности в процессе выполнения поставленных задач, в частности, четырехколесные роботы, подобные автомобилю, — автороботы. Как объекты управления роботы являются существенно нелинейными, что требует применения нелинейных методов синтеза систем управления. В то же время применение традиционных методов синтеза нелинейных систем управления затруднено сложным видом нелинейностей в уравнениях мобильных роботов, в том числе и автороботов. В данной работе задача синтеза решается с применением дискретно-непрерывной квазилинейной модели, которая создается на основе нелинейных дифференциальных уравнений авторобота в форме Коши. Из-за большой сложности нелинейностей уравнений авторобота соответствующая квазилинейная модель создается численным методом. Квазилинейная модель, полученная этим методом, является дискретно-непрерывной и управляемой, а ее переменные состояния доступны измерению. Дискретная система управления автороботом включает две практически независимые подсистемы управления: продольной скоростью и поворотами. Для управления скоростью применяется дискретный ПИ закон управления, а дискретная подсистема управления поворотами синтезируется методом желаемой динамики. Полученная система управления автороботом обеспечивает устойчивое движение по траектории, которая может быть задана как функция времени или как функция координат положения движущегося авторобота.

Предложенный подход может применяться для синтеза систем управления нелинейными объектами различного назначения со сложными дифференцируемыми нелинейностями. Однако задача синтеза имеет решение, если соответствующая дискретно-непрерывная квазилинейная модель объекта является управляемой, а переменные состояния доступны измерению.

Ключевые слова: объект управления, нелинейность, дискретно-непрерывная квазилинейная модель, продольное движение, поворот, закон управления, дискретная система управления

Введение

Роботизация различных производственных и бытовых процессов приобретает все более широкое распространение. На сегодняшний день насчитываются миллионы роботов самого различного назначения: исследовательские, бытовые, медицинские, военные, промышленные и т. д. Наиболее широко распространены, по-видимому, являются наземные мобильные роботы, совершающие перемещение по некоторой поверхности при решении поставленных задач. Такие роботы должны двигаться по довольно сложным траекториям, включающим прямолинейные и криволинейные участки, поэтому их конструкция должна допускать возможность движения с различной скоростью и совершения поворотов на произвольные углы, обусловленные заданной траекторией. Этими возможностями обладают четырехколесные роботы автомобильного типа (автороботы). Как и другие автономные мобильные роботы, автороботы являются нелинейными объектами управления, и для их эксплуатации необходимы соответствующие системы автоматического управления [1–5].

К настоящему времени разработано множество различных подходов к решению за-

дачи синтеза систем управления движением автономных мобильных роботов. В работе [1] представлена адаптивная система управления колесным балансирующим роботом, синтезированная с применением второго метода Ляпунова. При этом предполагается, что робот описывается уравнениями "перевернутого маятника" с неизвестными параметрами. В разработанной адаптивной системе управления используется оптимальный LQ-регулятор, параметры которого определяются с использованием текущей эталонной модели объекта, что требует выполнения большого числа вычислительных операций.

Система управления колесным роботом, синтезированная методом интеллектуальной эволюции, рассмотрена в работе [2]. В этой системе периодически с помощью генетического алгоритма генерируется множество возможных управлений, из которых выбирается Парето-оптимальное управление. Применение этого управления в течение нескольких периодов позволяет осуществить генерацию нового множества улучшенных управлений путем скрещивания, мутаций и отбора. Достоинством данного подхода является возможность учета изменений условий движения робота, а также неопределенности математи-

ческой модели самого робота, что повышает точность его движения по заданной траектории. Однако оперативная обработка большого объема информации требует применения вычислительных средств чрезвычайно высокого быстродействия.

Известный метод бэкстеппинга используется в статье [3] для построения системы управления с измерителем внешнего возмущения на основе модели мобильного колесного робота, описанной в работе [4]. Сложность этого подхода в том, что он может быть применен только в том случае, если нелинейные уравнения робота удалось представить в "треугольной" форме. Аналогично трудность применения других известных методов синтеза нелинейных систем управления, таких как преобразование уравнений объекта к линейной канонической форме Бруновского [6, 7], приведение к регулярной форме [8], метод пассивации [9], позиционно-траекторный метод [10], метод управляемой формы Жордана [11], также обусловлена необходимостью приведения исходных уравнений мобильных роботов к специальным формам.

В данной работе синтез системы управления осуществляется на основе дискретно-непрерывной квазилинейной модели авторобота, которая создается на основе нелинейных уравнений в форме Коши численным методом, предложенным в работе [12]. Для применения этого метода необходима только дифференцируемость нелинейностей исходных уравнений робота. Если полученная модель является управляемой, а переменные состояния измеряемыми, то обычными методами теории управления легко находится дискретный нелинейный закон управления движением авторобота [13]. В процессе синтеза системы управления учитываются условия реализуемости, поэтому в данном случае полученный закон легко реализуется на микроконтроллере. Некоторым недостатком использования дискретно-непрерывной модели является довольно большой объем вычислительных операций. Это связано с зависимостью коэффициентов этой модели от переменных состояния объекта управления, обусловленной нелинейным характером его исходных уравнений. Однако в настоящее время этот недостаток преодолевается применением многопроцессорных микроконтроллеров с операционными системами, ориентированными на параллельные вычисления [14].

Постановка задачи

На рис. 1 представлены неподвижная O_nXY и подвижная Oxy системы координат, а также в упрощенном виде силы, действующие на авторобот. Продольные силы F_{ij} создаются силами трения при вращении колес за счет передачи им вращающего момента от двигателя; боковые силы S_{ij} являются следствием взаимодействия кузова и упругих шин движущегося авторобота с дорогой [5, 15–17]. Как и в автомобилях, скорость авторобота управляется изменением силы тяги двигателя, а изменение направления движения — поворотом передних колес в вертикальной плоскости.

Математическая модель движений авторобота (рис. 1) по некоторой поверхности с некоторыми упрощениями может быть представлена [15, 16] в виде следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\dot{V}_n = m^{-1}[F_1 \cos(\beta - \delta) + S_1 \sin(\beta - \delta) + F_2 \cos \beta + S_2 \sin \beta - c_v V_n^2]; \quad (1)$$

$$\ddot{\psi} = I_z^{-1} \left[L_1(S_1 \cos \delta + F_1 \sin \delta) - L_2 S_2 + \frac{e}{2} \tilde{S}_1 \sin \delta - c_\psi \dot{\psi}^2 \right]; \quad (2)$$

$$\dot{\beta} = (mV)^{-1} [-F_1 \sin(\beta - \delta) + S_1 \cos(\beta - \delta) + S_2 \cos \beta] - \dot{\psi}; \quad (3)$$

$$\dot{X} = V_n \cos(\psi + \beta); \quad \dot{Y} = V_n \sin(\psi + \beta), \quad (4)$$

где V_n — продольная скорость авторобота; δ — угол поворота передних колес в вертикальной

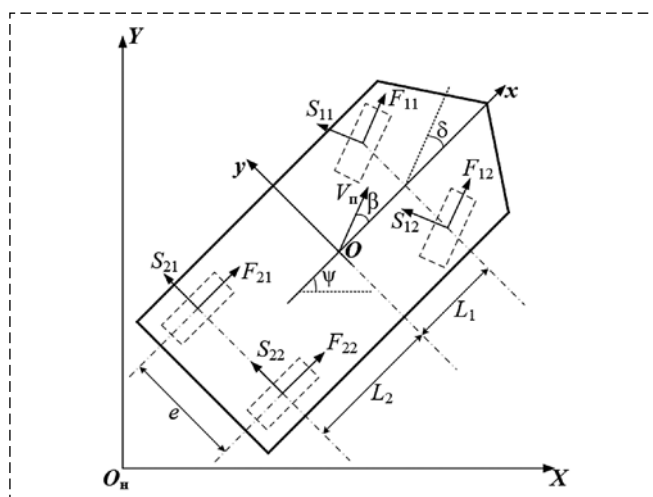


Рис. 1. Системы координат, параметры и силы модели авторобота

Fig. 1. Coordinate systems, parameters and forces of the autorobot model

плоскости; ψ и $\dot{\psi}$ — угол курса и скорость его изменения; β — угол между осью x и вектором скорости V_{Π} ; $F_i = F_{i1} + F_{i2}$, $S_i = S_{i1} + S_{i2}$, $i = 1, 2$; $\tilde{S}_1 = S_{11} - S_{12}$; F_{ij} и S_{ij} — продольные и боковые силы, действующие на колеса ($i = 1, 2$ — передние, задние; $j = 1, 2$ — левые, правые, соответственно); m — масса авторобота; I_z — момент инерции авторобота относительно вертикальной оси Oz ; c_v , c_{Π} — коэффициенты вязкого трения; L_1 и L_2 — расстояния между центром тяжести и передней и задней осью соответственно; e — ширина колеи.

Боковые силы S_{ij} являются результатом сложных динамических процессов, для математического описания которых используются достаточно равноценные модели, созданные на основе различных физических и эмпирических концепций [5, 14–17] и другие. В данной работе используется модель, предложенная в работе [16]. В соответствии с этой моделью боковые силы описываются выражениями

$$S_{ij} = -C_{ai} \operatorname{tg}(\gamma_{ij}) f(\lambda_{ij}), \quad (5)$$

где

$$\gamma_{ij} = \delta - \operatorname{arctg} \left(\frac{V_{\Pi} \beta + (-1)^{i-1} L_1 \dot{\psi}}{V_{\Pi} + (-1)^j e \dot{\psi} / 2} \right); \quad (6)$$

$$f(\lambda_{ij}) = \begin{cases} (2 - \lambda_{ij}) \lambda_{ij}, & \text{если } \lambda_{ij} < 1, \\ 1, & \text{если } \lambda_{ij} \geq 1; \end{cases} \quad (7)$$

$$\lambda_{ij} = \frac{\mu_{\max} \tilde{N}_{ij}}{2 C_{ai} \operatorname{tg}(\gamma_{ij})}.$$

В выражениях (5)–(7) C_{ai} — боковая жесткость шин; γ_{ij} — угол скольжения; μ_{\max} — максимальный коэффициент сцепления шин с дорогой; \tilde{N}_{ij} — нормальная нагрузка на шину, $i, j = 1, 2$.

Дискретно-непрерывная модель авторобота

Нелинейности в правых частях уравнений (1)–(7) являются довольно сложными, что существенно затрудняет применение аналитического метода построения квазилинейной модели авторобота, поэтому она была найдена численным методом, предложенным в работе [12]. Этот метод приводит к дискретно-непрерывной квазилинейной модели, которая в случае уравнений (1)–(7) имеет следующий вид:

$$\dot{x} = A(x_k)x + b_{1,k}u_{1,k} + b_{2,k}u_{2,k} + b_{3,k}f_{3,k}; \quad (8)$$

$$kT \leq t < (k+1)T; \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

$$\dot{X} = x_1 \cos(x_2 + x_4); \quad \dot{Y} = x_1 \sin(x_2 + x_4), \quad (9)$$

где $x = x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ x_4(t)]^T$ — вектор переменных состояния, причем $x_1 = V_{\Pi}$, $x_2 = \psi$, $x_3 = \dot{\psi}$, $x_4 = \beta$; $x_k = x(kT)$, $u_{1,k} = u_1(kT) = F_{1,k} + F_{2,k}$ и $u_{2,k} = u_2(kT) = \delta(kT)$ — дискретные значения вектора состояния, управлений продольной скоростью и направлением движения (поворотами) авторобота, соответственно; T — период дискретизации.

Матрицы и векторы в системе (8) определяются выражениями

$$A(x_k) = \begin{bmatrix} a_{11,k} & 0 & 0 & a_{14,k} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33,k} & 0 \\ a_{41,k} & 0 & -1 & a_{44,k} \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$b_{1,k} = \begin{bmatrix} b_{11,k} \\ 0 \\ 0 \\ b_{41,k} \end{bmatrix}; \quad b_{2,k} = \begin{bmatrix} b_{12,k} \\ 0 \\ b_{32,k} \\ b_{42,k} \end{bmatrix}; \quad b_{3,k} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

В выражениях (10) коэффициенты $a_{ij,k}$, $b_{ij,k}$, $f_{3,k}$, являются функциональными (их аргументы опущены для краткости). Они были определены указанным выше численным методом, что привело к следующим выражениям:

$$a_{11,k} = -c_v x_{1,k}; \quad a_{33,k} = -c_{\Pi} x_{3,k}; \quad (11)$$

$$a_{14,k} = \begin{cases} a_{14,k-1}, & \text{если } x_{14,k} = 0, \text{ иначе} \\ \frac{m^{-1}}{x_{4,k}} \sum_{i=0}^{N-1} S_k [\sin(\gamma_{1,i} x_{4,k}) - \sin(\gamma_{2,i} x_{4,k})]; \end{cases} \quad (12)$$

$$a_{41,k} = \begin{cases} a_{41,k-1}, & \text{если } x_{1,k} = 0, \text{ иначе} \\ S_k / m x_{1,k}^2; \end{cases} \quad (13)$$

$$a_{44,k} = \begin{cases} a_{44,k-1}, & \text{если } x_{1,k} = 0 \\ \text{или } x_{4,k} = 0, \text{ иначе} \\ \frac{m^{-1}}{x_{4,k} x_{1,k}} \sum_{i=0}^{N-1} S_k [\cos(\gamma_{1,i} x_{4,k}) - \cos(\gamma_{2,i} x_{4,k})]; \end{cases} \quad (14)$$

$$b_{11,k} = 2 m^{-1} \cos(x_{4,k}); \quad (15)$$

$$b_{12,k} = \begin{cases} b_{12,k-1}, & \text{если } u_{2,k} = 0, \text{ иначе} \\ \frac{m^{-1}}{u_{2,k}} \sum_{i=0}^{N-1} [u_{1,k} [\cos(x_{4,k} - \gamma_{1,i} u_{2,k}) - \cos(x_{4,k} - \gamma_{2,i} u_{2,k})] + S_{1,k} [\sin(x_{4,k} - \gamma_{1,i} u_{2,k}) - \sin(x_{4,k} - \gamma_{2,i} u_{2,k})]]; \end{cases} \quad (16)$$

$$b_{32,k} = \begin{cases} b_{32,k-1}, & \text{если } u_{2,k} = 0, \text{ иначе} \\ \frac{1}{u_{2,k} I_z} \sum_{i=0}^{N-1} [L_1 S_{1,k} [\cos(\gamma_{1,i} u_{2,k}) - \\ - \cos(\gamma_{2,i} u_{2,k})] + (L_1 u_{1,k} + e \tilde{S}_k / 2) \times \\ \times [\sin(\gamma_{1,i} u_{2,k}) - \sin(\gamma_{2,i} u_{2,k})]]; \end{cases} \quad (17)$$

$$f_{3,k} = -L_2 S_{2,k} / I_z; \quad (18)$$

$$b_{41,k} = \begin{cases} b_{41,k-1}, & \text{если } x_{1,k} = 0, \text{ иначе} \\ -(\sin x_{4,k}) / m x_{1,k}; \end{cases} \quad (19)$$

$$b_{42,k} = \begin{cases} b_{42,k-1}, & \text{если } x_{1,k} = 0, \text{ или } u_{2,k} = 0, \\ \text{иначе} \\ \frac{m^{-1}}{u_{2,k} x_{1,k}} \sum_{i=0}^{N-1} [u_{1,k} [-\sin(x_{4,k} - \gamma_{1,i} u_{2,k}) + \\ + \sin(x_{4,k} - \gamma_{2,i} u_{2,k})] + \\ + S_{1,k} [\cos(x_{4,k} - \gamma_{1,i} u_{2,k}) - \\ - \cos(x_{4,k} - \gamma_{2,i} u_{2,k})]]; \end{cases} \quad (20)$$

Здесь введены обозначения: $S_k = S_{1,k} + S_{2,k}$, $S_{1,k} = S_{11,k} + S_{12,k}$, $S_{2,k} = S_{21,k} + S_{22,k}$, $\tilde{S}_k = S_{11,k} - S_{12,k}$; $\gamma_1 = (i + 1,5)/N$, $\gamma_2 = (i + 0,5)/N$; N — параметр численного метода синтеза квазилинейных моделей [12]. Дискретные значения боковых сил $S_{ij,k}$ определяются по формулам (5)—(7) с учетом приведенных выше обозначений только в моменты времени kT , $k = 0, 1, 2, \dots$

Поставим задачу синтеза автономной дискретно-непрерывной системы управления автороботом, обеспечивающей устойчивое движение по заданной траектории, включающей прямолинейные участки и повороты, с заданной конечной скоростью.

Решение задачи

Как видно из уравнений (1) и (8), на скорость продольного движения робота V_{Π} влияют оба управления — как u_1 , так и u_2 . Для исключения этого явления управление $u_{1,k}$ принимается [18, 19] в виде

$$u_{1,k} = \begin{cases} u_{1,k-1}, & \text{если } b_{11,k} = 0, \text{ иначе} \\ [\zeta(\varepsilon_{V,k}) - b_{12,k} u_{2,k} - a_{14,k} x_{4,k}] / b_{11,k}, \end{cases} \quad (21)$$

где $\zeta(\varepsilon_{V,k})$ — функция управления продольной скоростью; $\varepsilon_{V,k} = V_{\Pi,k}^* - x_{1,k}$; $V_{\Pi,k}^*$ — заданное

значение скорости продольного движения авторобота, $k = 0, 1, 2, \dots$. Функция $\zeta(\varepsilon_{V,k})$ в данном случае выбирается простейшего вида:

$$\zeta(\varepsilon_{V,k}) = \varsigma_1 \varepsilon_{V,k} + \varsigma_2 q_k + c_v x_{1,k}^2; \quad q_k = q_{k-1} + \varepsilon_{V,k}, \quad (22)$$

где ς_1, ς_2 — параметры закона управления (21), (22); $q_{-1} = 0$.

Синтез подсистемы управления направлением движения авторобота осуществляется известным методом желаемой динамики. В данном случае дифференциальное уравнение, описывающее отклонение угла поворота $\psi(t)$ робота от заданного закона изменения $\psi^* = \psi^*(t)$, принято второго порядка:

$$\ddot{\varepsilon}_{\psi} + \varsigma_3 \dot{\varepsilon}_{\psi} + \varsigma_4 \varepsilon_{\psi} = 0,$$

где $\varepsilon_{\psi} = \psi^* - x_2$ — отклонение угла поворота [19]. При этом первая и вторая производные угла $\psi^*(t)$ заменены их приближенными значениями, которые вычисляются по формулам Эйлера. Отсюда с учетом системы (8) и выражений (11), (17), (18) вытекает дискретный закон управления поворотами авторобота:

$$u_{2,k} = \begin{cases} u_{2,k-1}, & \text{если } b_{32,k} = 0, \text{ иначе} \\ [\varsigma_5 \psi_k^* + \varsigma_6 \psi_{k-1}^* + \varsigma_7 \psi_{k-2}^* - \\ - (\varsigma_3 + a_{33,k}) x_{3,k} + \varsigma_4 x_{2,k}] / b_{32,k}; \end{cases} \quad (23)$$

где $\varsigma_5 = (1 + \varsigma_3 T + \varsigma_4 T^2) \varsigma_7$; $\varsigma_6 = (2 + \varsigma_3 T) \varsigma_7$; $\varsigma_7 = 1/T^2$; $k = 0, 1, 2, \dots$; коэффициенты ς_3, ς_4 выбираются исходя из желаемого характера и длительности переходного процесса по углу поворота $\psi = \psi(t)$.

Найденные выражения (1)—(20) дают модель движений авторобота, а (21)—(23) — дискретные законы управления им.

Исследование системы управления

Для исследования системы управления проведено имитационное моделирование в MATLAB движений мобильного авторобота по заданным траекториям при следующих значениях параметров: $m = 360$ кг, $I_z = 2800$ кг·м²; $L_1 = L_2 = 1,5$ м; $e = 1,5$ м; $C_{ai} = 0,5$ кг·с/см²; $N_{ij} = 900$ Н; $\mu_{\max} = 0,0002$; $c_v = 0,07$ кг/м; $c_{\Pi} = 0,01$ Н·м; $\varsigma_1 = 4,5$ с⁻¹; $\varsigma_2 = 0,07$ с⁻¹; $\varsigma_3 = 5$ с⁻¹; $\varsigma_4 = 6$ с⁻², $N = 200$ и $T = 0,1$ с. При этом предполагалось, что авторобот снабжен измерите-

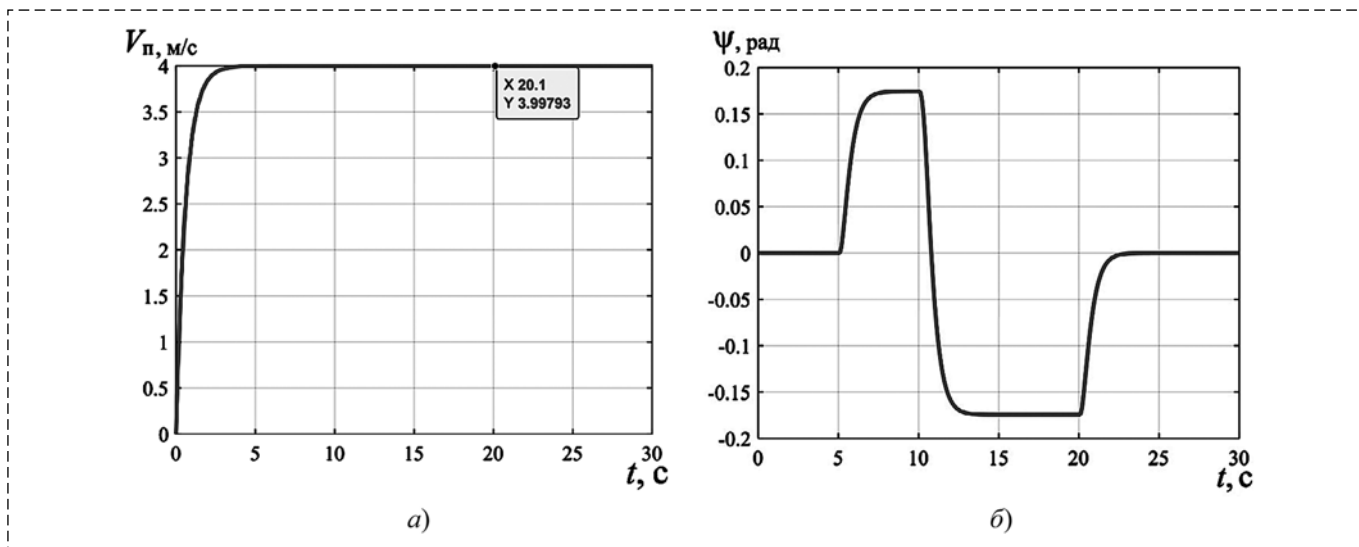


Рис. 2. Движение авторобота с поворотами:

a — график изменения продольной скорости; b — график изменения углов поворотов

Fig. 2. Movement of the robot with turns:

a — graph of the longitudinal velocity changes; b — graph of the angles of turns changes

лями продольной скорости и углов поворота, с пренебрежимо малыми ошибками и запаздыванием. Например, это может быть инерциальная система навигации, результаты которой периодически корректируются с применением системы ГЛОНАСС.

Результаты компьютерного исследования синтезированной системы представлены на рис. 2–6. Отработка автороботом заданных продольной скорости и углов поворота представлена на рис. 2, a , b и рис. 3. Предполагается, что при $t = 0$ ось Ox неподвижного авторобота параллельна оси $O_n X$, а координаты X и Y равны нулю. Стартуя при $t = 0$, авторобот должен набрать скорость 4 м/с и двигаться пря-

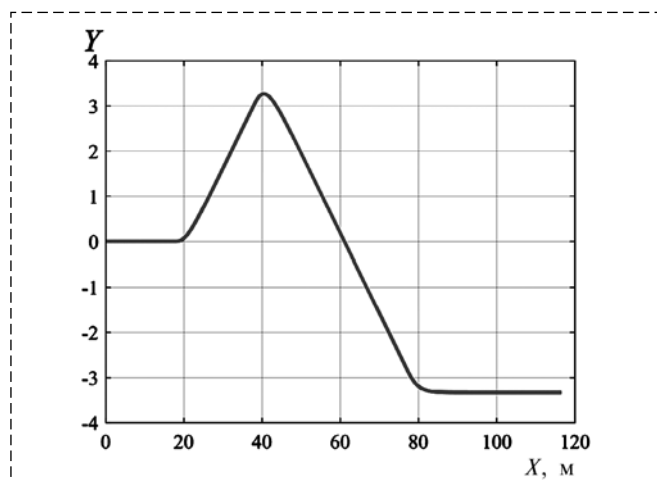


Рис. 3. Результирующая траектория движения

Fig. 3. The resulting trajectory of movement

молинейно ($\psi = 0^\circ$) с этой скоростью до пятой секунды. При $t = 5$ с авторобот должен начать поворот влево на угол 10° , а через 5 с — начать поворот вправо на 20° и двигаться под углом -10° к оси $O_n X$ до 20-й секунды. В этот момент он должен повернуть влево на 10° и двигаться параллельно оси $O_n X$ до 30-й секунды.

Как видно из графиков на рис. 2, a и 2, b , продольная скорость авторобота V_n и углы поворота в установившемся режиме соответствуют заданным значениям.

На рис. 3 приведена результирующая траектория движения авторобота по горизонтальной поверхности, соответствующая маневрам, выполненным автороботом. Отметим, что перемещение авторобота вдоль оси $O_n X$ составило ≈ 120 м за 30 с, что соответствует заданной скорости.

Траектории движения авторобота в общем случае могут задаваться программой изменения углов поворота, являющейся функцией времени, как показано выше, а также в виде функции координат X, Y , т. е. как функции перемещения авторобота вдоль осей $O_n X$ и $O_n Y$. В качестве примера приведем описание программы движения авторобота по более сложной траектории. Авторобот стартует также при $t = 0$ из того же положения, что и выше, но здесь он должен двигаться со скоростью 5 м/с в течении 78 с.

Заданная траектория: сначала авторобот должен двигаться под углом 45° к оси $O_n X$ до

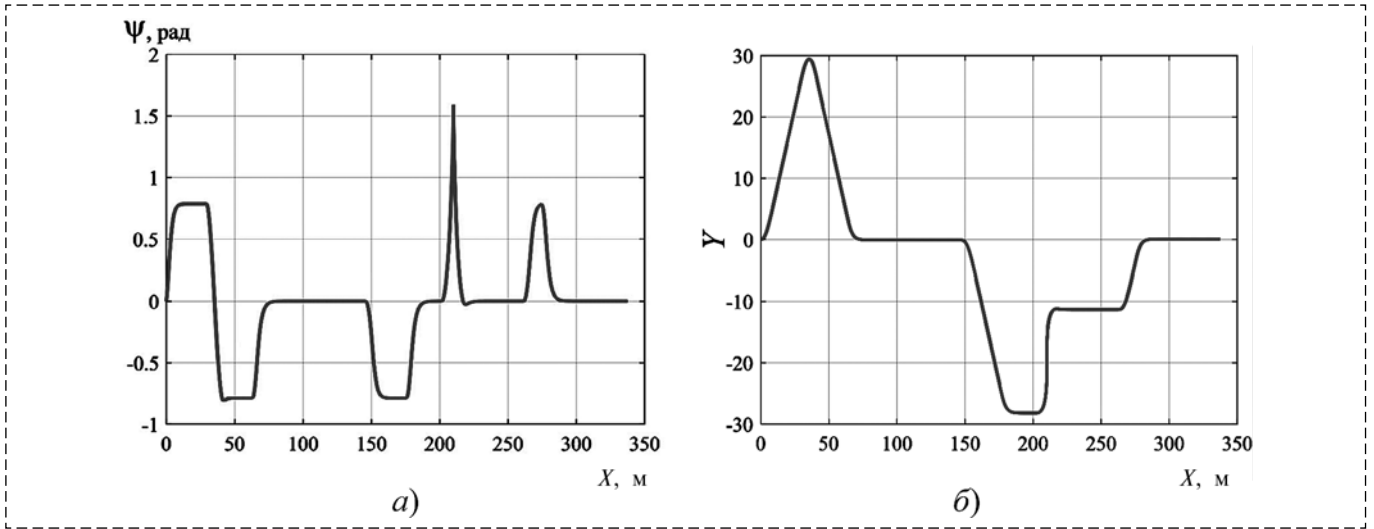


Рис. 4. Результаты моделирования:

a — график изменения углов поворота; *б* — результирующая траектория

Fig. 4. Simulation results:

a — graph of the turns angles change; *b* — the resulting trajectory

$X = 25$ м. В этой точке он должен начать поворот вправо на 90° и далее двигаться под углом -45° до $X = 65$ м. Здесь авторобот должен начать поворот влево на 45° и, достигнув угла 0° к оси $O_H X$, двигаться в этом направлении до $X = 145$ м. Здесь необходимо повернуть вправо на угол 45° и двигаться под углом -45° до $X = 175$ м. Затем авторобот должен повернуть влево на угол 45° и, достигнув угла 0° к оси $O_H X$, двигаться в этом направлении до $X = 200$ м. Здесь авторобот должен повернуть влево на 90° и двигаться в этом направлении до $X = 210$ м; в этой точке робот должен повернуть вправо на угол 90° и двигаться в этом направлении (перпендикулярно оси $O_H X$) до достижения координаты $Y = -11$ м. В этой точке авторобот должен

повернуть вправо на 90° и двигаться в направлении, параллельном оси $O_H X$, до $X = 265$ м. Здесь авторобот должен повернуть влево на 45° влево и двигаться до $X = 275$ м, где повернуть вправо на 45° и двигаться в этом направлении до конца маршрута.

Изменения углов поворота авторобота в функции координаты X и траектория движения авторобота, полученные путем имитационного моделирования, приведены на рис. 4. Эти графики свидетельствуют, что авторобот достаточно точно следует заданной программе движения.

Для более полного представления особенностей описанного процесса движения авторобота на рис. 5 приведен график изменения

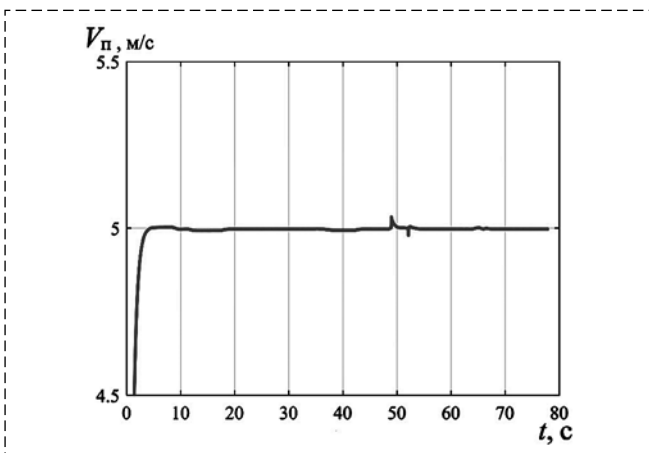


Рис. 5. Продольная скорость

Fig. 5. Longitudinal velocity

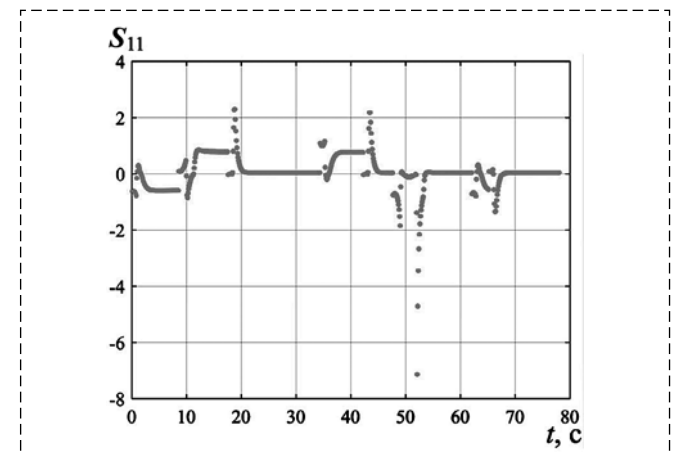


Рис. 6. Боковые силы

Fig. 6. Transverse forces

продольной скорости авторобота, а на рис. 6 показаны боковые силы, действующие на переднее левое колесо. Аналогичный характер имеют и силы, приложенные к другим колесам авторобота.

Как видно, боковые силы возникают только при поворотах авторобота, когда его кузов из-за инерции отклоняется в сторону, вызывая деформацию шин. Отметим, что при изменении направления поворота авторобота знаки боковых сил изменяются на противоположные, что соответствует реальной ситуации. При этом продольная скорость движения поддерживается системой управления достаточно точно, хотя при поворотах она изменяется в небольших интервалах.

Заданная траектория имеет множество поворотов на разные углы, однако синтезированная система управления обеспечивает движение авторобота в безэкипажном режиме по ней достаточно точно.

Заключение

На основании результатов моделирования движений авторобота, приведенных выше, можно заключить, что дискретно-непрерывная квазилинейная модель нелинейного авторобота, полученная численным методом, достаточно точно описывает его движения. Синтезированная на основе этой квазилинейной модели дискретная система управления автономного авторобота обеспечивает его движение по сложной заданной траектории с заданной скоростью. При этом предполагается, что авторобот оснащен системой измерения скорости, углов поворота и координат текущего положения авторобота. В этом случае необходимая траектория движения может быть предварительно задана либо как функция времени, либо как функция координат его текущего положения. Для движения по дорогам, без предварительного задания траектории, автономный авторобот может быть оборудован системой слежения за дорогой.

Список литературы

1. Ivoilov A. Yu., Zhmud V. A., Trubin V. G., Roth H. Parametric Synthesis of the Control System of the Balancing Robot by the Numerical Optimization Method // *Mekhatronica, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2019. Vol. 20, N. 6. P. 532–361. DOI: [org/10.17587/mau.20.352-361](https://doi.org/10.17587/mau.20.352-361).

2. Дивеев А. И., Шмалько Е. Ю. Синтез системы управления мобильным роботом методом интеллектуальной эволюции // *Надежность и качество сложных систем*. 2013. № 3. С. 52–59.
3. Benaoumeur I., Laredj B., Kamel B., Reda H. E., Zoubir A. F. Backstepping controller with force estimator applied for mobile robot // *Przeglad Elektrotechniczny, Wydawnictwo Czasopism i Ksiazek Technicznych Sigma*. 2019. Vol. 10. P. 18–21. DOI: [10.15199/48.2019.10.03](https://doi.org/10.15199/48.2019.10.03)
4. Cruz C. D. L., Carelli R. O. Dynamic modeling and centralized formation control of mobile robots // *IECON 2006 — 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*. P. 3880–3885. DOI: [10.1109/IECON.2006.347299](https://doi.org/10.1109/IECON.2006.347299)
5. Pacejka H. B. *Tyre and Vehicle Dynamics*. Amsterdam: Elsevier, 2006. 642 p.
6. Воевода А. А., Филюшов В. Ю. Линеаризация обратной связью: перевернутый маятник // *Сборник научных трудов НГТУ*. 2016. № 3(85). С. 49–60.
7. Isidori A. Robust Feedback Design for Nonlinear Systems: a Survey // *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2010. Vol. 18. P. 693–714.
8. Лукьянов А. Г., Уткин В. И. Метод преобразования уравнений динамических систем к регулярной форме // *Автоматика и телемеханика*. 1981. № 4. С. 5–13.
9. Xia M., Rahnama A., Wang S., Antsaklis P. J. Control Design Using Passivation for Stability and Performance // *IEEE Transactions on control*. 2018. Vol. 63, No. 9. P. 2987–2993.
10. Pshikhopov V., Medvedev M. Position Control of Vehicles with Multi-Contour Adaptation // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. Vol. 13. P. 8921–8928.
11. Gaiduk A. R. Design of nonlinear systems based on the controllable Jordan form // *Automation and Remote Control*. 2006. Vol. 67, No. 7. P. 1017–1027.
12. Гайдук А. Р. Численный метод синтеза квазилинейных моделей нелинейных объектов // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2021. Т. 22, № 6. С. 283–290.
13. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. О проблеме согласной параллельной коррекции систем регулирования // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2015. Том 16, № 8. С. 507–514. DOI: [org/10.17587/mau.16.507-514](https://doi.org/10.17587/mau.16.507-514).
14. Жуков К. Г. Алгоритм реализации параллельных вычислений по формулам Рунге-Кутты // *Информатика, телекоммуникации, управление*. 2021. Вып. 6(138). Часть 2. С. 143–149.
15. Dugoff H., Fancher P., Segel L. An Analysis of Tire Traction Properties and Thire Influence on Vehicle Dynamic Performance // *SAE paper 700377*. February 01, 1970.
16. Cunha F. H. R., Victorino A. C., Ghandour R., Charara A. Vehicle Dynamics Prediction Based on State Observers Entries Anticipation // *Preprints on the 18th IFAC World Congress, Milano, August 28 — September 2. 2011*. P. 2260–2265.
17. Можаровский В. В., Кузьменков Д. С., Василевич Ю. В., Киргинцева С. В. Методика и алгоритм расчета параметров контакта при взаимодействии шины колеса с основанием // *Математические методы в технологиях и технике*. 2022. № 11. С. 43–47. DOI [10.52348/2712-8873_MMTT_2022_11_43](https://doi.org/10.52348/2712-8873_MMTT_2022_11_43).
18. Кабала А. Е. А., Гайдук А. Р. Преобразование модели автономного робота // *Математические методы в технологиях и технике*. 2021. № 7. С. 27–30.
19. Лукин Д. С., Гайдук А. Р. Дискретное управление движением автономного робота автомобильного типа // *Математические методы в технологиях и технике*. 2022. № 1. С. 17–20. DOI [10.52348/2712-8873_MMTT_2022_1_17](https://doi.org/10.52348/2712-8873_MMTT_2022_1_17).

Design of Nonlinear Control Systems for Autorobots

A. R. Gaiduk, gaiduk_2003@mail.ru, D. S. Lukin, dlukin@sfnu.ru,
Southern Federal University, Taganrog, 347922, Russian Federation

Corresponding author: Gaiduk A. R., Dr. of Sc., Professor, Southern Federal University,
Taganrog, 347922, Russian Federation, e-mail: gaiduk_2003@mail.ru

Accepted on November 09, 2022

Abstract

Currently, various types of robots are increasingly being used to solve different tasks. Most often, these are mobile robots that move on the earth's surface performing the assigned tasks, in particular, they are four-wheeled robots similar to a car — autorobots. As control objects, the robots are essentially nonlinear, which requires the use of nonlinear methods for the control system design. At the same time, it is difficult to apply traditional methods for designing nonlinear control systems due to a complex type of nonlinearities in the equations of mobile robots and, in particular, autorobots. In this paper, the design problem is solved using a discrete-continuous quasilinear model, which is created on the basis of the nonlinear differential equations in the Cauchy form. Due to the great complexity of the nonlinearities of the autorobot equations, the corresponding quasilinear model is created by the numerical method. The quasilinear model obtained by this method is discrete-continuous and controllable, moreover, its state variables are measurable. The discrete autorobot control system includes two practically independent control subsystems: longitudinal speed and turns. A discrete PI control law is used to control the speed, and the discrete turn control subsystem is designed by the method of desired dynamics. The resulting autorobot control system provides a stable movement along the trajectory, which can be set as a function of time or as a function of the coordinates of the moving autorobot's position.

The suggested approach can be used to design control systems for nonlinear objects of various purposes with complex differentiated nonlinearities. However, the design problem has a solution if the corresponding discrete-continuous quasilinear model of the object is controllable, and the state variables are measurable.

Keywords: controlled object, nonlinearity, discrete-continuous quasilinear model, longitudinal motion, turn, control law, control system

For citation:

Gaiduk A. R., Lukin D. S. Design of Nonlinear Control Systems for Autorobots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 2, pp. 85–92.

DOI: 10.17587/mau.24.85-92

References

1. Ivoilov A. Yu., Zhmud V. A., Trubin V. G., Roth H. Parametric synthesis of the control system of the balancing robot by the numerical optimization method, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 6, pp. 532–361, DOI: org/10.17587/mau.20.352-361
2. Diveev A. I., Shmal'ko E. Yu. Synthesis of a Mobile Robot Control System by Method of Intellectual Evolution, *Reliability and Quality of Complex Systems*. 2013, no. 3, pp. 52–59 (In Russian).
3. Benaoumeur I., Laredj B., Kamel B., Reda H. E., Zoubir A. F. Backstepping Controller with Force Estimator Applied for Mobile Robot, *Przeglad Elektrotechniczny, Wydawnictwo Czasopism i Ksiazek Technicznych Sigma*, 2019, vol. 10, pp. 18–21, DOI: 10.15199/48.2019.10.03
4. Cruz C. D. L., Carelli R. O. Dynamic modeling and centralized formation control of mobile robots, *IECON 2006 – 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, pp. 3880–3885, doi: 10.1109/IECON.2006.347299.
5. Pacejka H. B. Tyre and Vehicle Dynamics, Amsterdam, Elsevier, 2006, 642 p.
6. Voevoda A. A., Filiushov V. Yu. Linearization by feedback: Inverted Pendulum, *Transaction of Scientific Papers of the Novosibirsk State Technical University*, 2016, no. 3(85), pp. 49–60 (In Russian).
7. Isidori A. Robust Feedback Design for Nonlinear Systems: a Survey, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2010, vol. 18, pp. 693–714.
8. Lukyanov A. G., Utkin V. I. Methods of transform of dynamic systems equations to regular form, *Avtomatika i Telemekhanika*, 1981, no. 4, pp. 5–13 (In Russian).
9. Xia M., Rahnama A., Wang S., Antsaklis P. J. Control Design Using Passivation for Stability and Performance, *IEEE Transactions on control*, 2018, vol. 63, no. 9, pp. 2987–2993.
10. Pshikhopov V., Medvedev M. Position Control of Vehicles with Multi-Contour Adaptation, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 13, pp. 8921–8928.
11. Gaiduk A. R. Design of nonlinear systems based on the controllable Jordan form, *Automation and Remote Control*, 2006, vol. 67, no. 7, pp. 1017–1027.
12. Gaiduk A. R. Numerical Design Method of Quasilinear Models for Nonlinear Objects, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 6, pp. 283–290 (In Russian).
13. Filimonov A. B., Filimonov N. B. On the problem of consonant parallel correction of regulatory systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 8, pp. 507–514 (In Russian), DOI.org/10.17587/mau.16.507-514
14. Zhukov K. G. Algorithm for implementing parallel computations using Runge-Kutta formulas, *Computer science, telecommunications, management*, 2021, iss. 6(138), part 2, pp. 143–149 (In Russian).
15. Dugoff H., Fancher P., Segel L. An Analysis of Tire Traction Properties and Thire Influence on Vehicle Dynamic Performance, *SAE paper 700377*, February 01, 1970.
16. Cunha F. H. R., Victorino A. C., Ghandour R., Charara A. Vehicle Dynamics Prediction Based on State Observers Entries Anticipation, *Preprints on the 18th IFAC World Congress, Milano, August 28 – September 2, 2011*, pp. 2260–2265.
17. Mozharovsky V. V., Kuzmenkov D. S., Vasilevich Yu. V., Kirgintseva S. V. Methodology and algorithm for calculating contact parameters during the interaction of the wheel tire with the base, *Mathematical methods in technologies and engineering*, 2022, no. 11, pp. 43–47 (In Russian), doi 10.52348/2712-8873_MMTT_2022_11_43
18. Kabalan A. E. A., Gaiduk A. R. Transformation of an autonomous robot model, *Mathematical methods in technology and engineering*, 2021, no. 7, pp. 27–30 (In Russian).
19. Lukin D. S., Gaiduk A. R. Discrete motion control of an autonomous robot of automobile type, *Mathematical methods in technologies and engineering*, 2022, no. 1, pp. 17–20 (In Russian), DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2022_1_17