

УДК 621.86.033:004.896

А.А. Скляр, С.А. Скляр

**СИНЕРГЕТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ
С ГУСЕНИЧНЫМ ШАССИ***

Мобильные роботы используются во многих областях науки, техники и промышленности, в первую очередь там, где жизнедеятельность человека либо затруднена, либо вообще невозможна. В условиях плохой проходимости для решения задач, поставленных перед мобильным роботом, используют гусеничное шасси вместо стандартного колесного. Гусеничное шасси обладает большей площадью сцепления с поверхностью, относительно колесного, однако это накладывает некоторое ограничение по скорости передвижения мобильного робота. В статье рассмотрены вопросы анализа математической модели мобильного робота с гусеничным двигателем и синтеза закона управления данным роботом методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов.

Мобильный робот; гусеничное шасси; инварианты; синергетическая теория управления.

A.A. Scliarov, S.A. Scliarov

SYNERGETIC CONTROL OF TRACKED MOBILE ROBOT

The mobile robots are used in many parts of science, technics and industry, first of all in places where people's work is very harmful. In conditions of difficult passableness are used robots based on tracked chassis instead of standard wheeled chassis. The tracked chassis has more space of coupling with ground than wheeled chassis, but it has some limits of speed. In article are considered questions of analysis of math model of mobile robot with tracked chassis and control law synthesis by method of analytics construction of aggregated regulators.

Mobile robot; tracked chassis; invariants; synergetic control theory.

Введение. В настоящее время существует множество шасси, используемых в качестве основы для мобильных роботов. Однако выделяют три основных вида: колесные, шаговые и гусеничные шасси. Мобильные роботы с гусеничным двигателем применяются в условиях плохой проходимости, где стандартное колесное или шаговое шасси имеет малую эффективность, в частности по пересеченной местности с неустойчивым грунтом. Характеристики управляемости гусеничных мобильных роботов, в особенности при повороте, существенно различаются от роботов, использующих колесное шасси.

Математическая модель. При повороте с проскальзыванием гусениц сила тяги на одной из них увеличивается, а на другой снижается. В результате этого действия создается поворачивающий момент для преодоления момента сопротивления повороту M_r .

Режим поворота гусеничных машин с использованием проскальзывания зависит от тяговых сил на забегающей F_o и отстающей F_i гусеницах, результирующего сопротивления R_r , момента сопротивления повороту M_r , приложенного к гусенице со стороны грунта, и параметров машины (рис. 1).

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-08-00912-а).

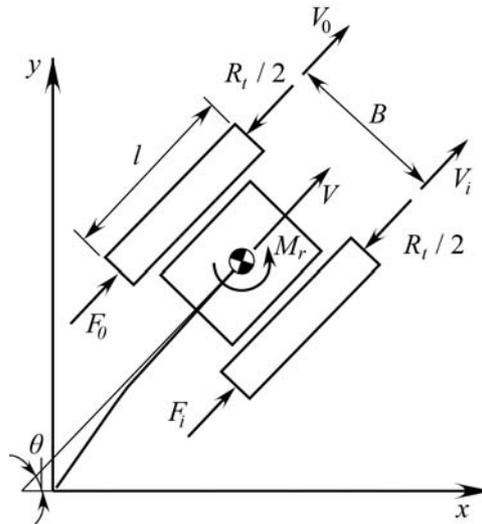


Рис. 1. Схема поворота со скольжением гусениц

Так как мобильный робот имеет малую скорость передвижения, то центробежной силой можно пренебречь, при этом режим движения описывается следующей системой дифференциальных уравнений [1, 2]:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= V; \\ m \frac{dV}{dt} &= (F_o + F_i) - R_t; \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega; \\ I_z \frac{d\omega}{dt} &= \frac{B}{2} (F_o - F_i) - M_r, \end{aligned} \quad (1)$$

где S – перемещение центра тяжести робота; θ – угловое перемещение робота; V – линейная скорость робота; ω – угловая скорость робота; B – колея робота (т.е. расстояние между центральными линиями гусениц); I_z – момент инерции массы робота относительно вертикальной оси, проходящей через его центр тяжести; m – масса робота.

Результирующее сопротивление движению робота при малых скоростях вычисляется следующим образом:

$$R_t = f_r W, \quad (2)$$

где f_r – коэффициент сопротивления движению робота, зависящий от характеристики поверхности; W – вес робота.

Момент сопротивления повороту при малых скоростях вычисляется следующим образом:

$$M_r = \frac{\mu_t W l}{4}, \quad (3)$$

где μ_t – коэффициент сопротивления повороту робота, зависящий от характеристики местности и от конструкции гусеницы; l – длина гусеницы робота.

Таким образом, с учетом (2) и (3) математическая модель мобильного робота описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= V; \\ m \frac{dV}{dt} &= (F_o + F_i) - f_r W; \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega; \\ I_z \frac{d\omega}{dt} &= \frac{B}{2} (F_o - F_i) - \frac{\mu_t W l}{4}. \end{aligned} \quad (4)$$

Синтез закона управления. При синтезе законов управления мобильного робота с гусеничным движителем в статье используются принципы и методы синергетической теории управления (СТУ) [3 – 5]. В СТУ совокупность критериев управления системы принято выражать в виде соответствующей системы инвариантов. Инварианты выступают в роли цели управления, на них обеспечивается выполнение заданной технологической задачи, а процедура синергетического синтеза сводится к поиску законов управления, при которых эти заданные инварианты выполняются.

В качестве инвариантов для мобильного робота выберем перемещение центра тяжести $S = S_0$ и угловое перемещение $\theta = \theta_0$. Таким образом, подмножество целей для подсистемы привода будет иметь вид

$$\Sigma_1 = \{S = S_0, \theta = \theta_0\}, \quad (5)$$

где S_0 – задание по перемещению центра тяжести робота; θ_0 – задание по угловому перемещению в плоскости.

Мобильный робот подвержен действию внешних возмущений R_t и M_r . Поэтому необходимо, чтобы синтезируемый закон векторного управления обеспечивал их подавление. В соответствии с методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [3–5] влияние указанных возмущений можно учесть за счет расширения математической модели исходной системы. Для этого вводятся дополнительные переменные z_1 и z_2 , которые являются оценкой внешних возмущений:

$$\frac{dz_1}{dt} = \eta_1 (S_0 - S); \quad (6)$$

$$\frac{dz_2}{dt} = \eta_2 (\theta_0 - \theta), \quad (7)$$

где η_1 и η_2 – некоторые коэффициенты, определяющие скорость компенсации возмущений.

Таким образом, с учетом (6) и (7) запишем расширенную математическую модель синергетического синтеза для мобильного робота:

$$\begin{aligned}
 \frac{dz_1}{dt} &= \eta_1(S_0 - S); \\
 \frac{dz_2}{dt} &= \eta_2(\theta_0 - \theta); \\
 \frac{dS}{dt} &= V; \\
 \frac{dV}{dt} &= \frac{(F_o + F_i)}{m} - \frac{z_1}{m}; \\
 \frac{d\theta}{dt} &= \omega; \\
 \frac{d\omega}{dt} &= \frac{B}{2I_z}(F_o - F_i) - \frac{z_2}{I_z}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Согласно процедуре синтеза методом АКАР [3–5] введем первую совокупность макропеременных

$$\begin{aligned}
 \Psi_1 &= \beta_1(V - \varphi_1) + \beta_2(\omega - \varphi_2); \\
 \Psi_2 &= \beta_3(V - \varphi_1) + \beta_4(\omega - \varphi_2),
 \end{aligned} \tag{9}$$

удовлетворяющую решению $\Psi_1 = 0$ и $\Psi_2 = 0$ системы функциональных уравнений

$$\begin{aligned}
 \frac{d\Psi_1}{dt} + \lambda_1\Psi_1 &= 0; \\
 \frac{d\Psi_2}{dt} + \lambda_2\Psi_2 &= 0,
 \end{aligned} \tag{10}$$

где $\lambda_1, \lambda_2 > 0$ и $\beta_1\beta_4 \neq \beta_2\beta_3$. При попадании изображающей точки (ИТ) замкнутой системы в окрестность пересечения многообразий $\Psi_1 = 0$ и $\Psi_2 = 0$ происходит динамическая декомпозиция. В результате поведение мобильного робота на пересечении многообразий будет описываться как

$$\begin{aligned}
 \frac{dz_1}{dt} &= \eta_1(S_0 - S); \\
 \frac{dz_2}{dt} &= \eta_2(\theta_0 - \theta); \\
 \frac{dS}{dt} &= \varphi_1; \\
 \frac{d\theta}{dt} &= \varphi_2.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Однако для того чтобы выполнить условия подмножества целей (5), необходимо ввести макропеременные

$$\begin{aligned}\Psi_3 &= S - \varphi_3; \\ \Psi_4 &= \theta - \varphi_4,\end{aligned}\tag{12}$$

решение которых $\Psi_3 = 0$ и $\Psi_4 = 0$ удовлетворяет системе функциональных уравнений

$$\begin{aligned}\frac{d\Psi_3}{dt} + \lambda_3\Psi_3 &= 0; \\ \frac{d\Psi_4}{dt} + \lambda_4\Psi_4 &= 0.\end{aligned}\tag{13}$$

На пересечении многообразий $\Psi_3 = 0$ и $\Psi_4 = 0$ поведение замкнутой системы будет описываться следующей декомпозированной системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{dz_1}{dt} &= \eta_1(S_0 - \varphi_3); \\ \frac{dz_2}{dt} &= \eta_2(\theta_0 - \varphi_4).\end{aligned}\tag{14}$$

Очевидно, что для того чтобы решение системы (14) было асимптотически устойчиво относительно положения равновесия $z_1 = z_2 = 0$, внутренние управления φ_3 и φ_4 достаточно выбрать следующим образом:

$$\begin{aligned}\varphi_3 &= \alpha_1 z_1; \\ \varphi_4 &= \alpha_2 z_2.\end{aligned}\tag{15}$$

Тогда из совместного решения (12) и (13) с учетом (11) и (15) получим выражения для внутренних управлений φ_1 и φ_2 :

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \alpha_1 \eta_1 (S_0 - S) - \lambda_3 (S - \alpha_1 z_1); \\ \varphi_2 &= \alpha_2 \eta_2 (\theta_0 - \theta) - \lambda_4 (\theta - \alpha_2 z_2); \\ \dot{\varphi}_1 &= a + \beta_1 cV + \beta_2 d\omega + \beta_1 \left(\frac{F_0 + F_i}{m} - \frac{z_1}{m} \right) + \beta_2 \left(\frac{B}{2} \frac{F_0 - F_i}{I_z} - \frac{z_2}{I_z} \right) + \lambda_1 \Psi_1;\end{aligned}\tag{16}$$

$$\dot{\varphi}_2 = b + \beta_3 cV + \beta_4 d\omega + \beta_3 \left(\frac{F_0 + F_i}{m} - \frac{z_1}{m} \right) + \beta_4 \left(\frac{B}{2} \frac{F_0 - F_i}{I_z} - \frac{z_2}{I_z} \right) + \lambda_2 \Psi_2,\tag{17}$$

где

$$\begin{aligned}a &= -\beta_1 \lambda_3 \alpha_1 \eta_1 (S_0 - S) - \beta_2 \lambda_4 \alpha_2 \eta_2 (\theta_0 - \theta), \\ b &= -\beta_3 \lambda_3 \alpha_1 \eta_1 (S_0 - S) - \beta_4 \lambda_4 \alpha_2 \eta_2 (\theta_0 - \theta), \\ c &= \alpha_1 \eta_1 + \lambda_3, \\ d &= \alpha_2 \eta_2 + \lambda_4.\end{aligned}$$

Для нахождения закона управления мобильным роботом подставим (9) в (10). В результате, с учетом математической модели синергетического синтеза (8), получим законы векторного управления мобильным роботом:

$$\begin{aligned}
 F_i &= \frac{z_1}{2} - \frac{z_2}{B} - (2I_z(\beta_3(a + \lambda_1\Psi_1) - d\omega X - \beta_1(b + \lambda_2\Psi_2)) + \\
 &\quad + mB(cVX + \beta_4(a + \lambda_1\Psi_1) - \beta_2(b + \lambda_2\Psi_2))) / 2BX; \\
 F_0 &= \frac{z_1}{2} + \frac{z_2}{B} - (2I_z(-\beta_3(a + \lambda_1\Psi_1) + d\omega X + \beta_1(b + \lambda_2\Psi_2)) + \\
 &\quad + mB(cVX + \beta_4(a + \lambda_1\Psi_1) - \beta_2(b + \lambda_2\Psi_2))) / 2BX,
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

где $X = \beta_1\beta_4 - \beta_2\beta_3$. Таким образом, синтезирован регулятор, обеспечивающий требуемое значение линейного $S = S_0$ и углового $\theta = \theta_0$ перемещения мобильного гусеничного робота.

Результаты моделирования. Проведем компьютерное исследование синтезированной замкнутой системы управления мобильным гусеничным роботом. На рис. 2 – 6 представлены результаты моделирования при следующих параметрах:

- ◆ возмущений внешней среды: $R_f = 0,1$, $M_r = 0,1$;
- ◆ механизма: $m = 0,7$ кг, $I_z = 0,001 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $B = 0,12$ м;
- ◆ регулятора: $S_0 = 5$, $\theta_0 = 0,5$, $\eta_1 = 10$, $\eta_2 = 10$, $\alpha_1 = 2$, $\alpha_2 = 2$, $\lambda_1 = 10$, $\lambda_2 = 10$, $\lambda_3 = 10$, $\lambda_4 = 10$, $\beta_1 = 1$, $\beta_2 = 2$, $\beta_3 = 3$, $\beta_4 = 4$.

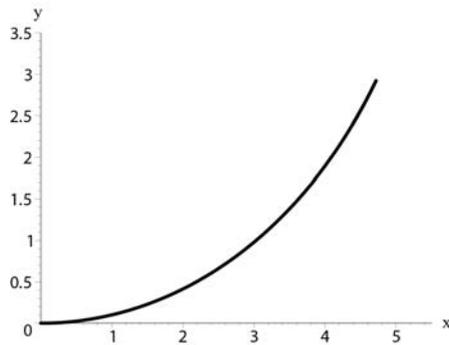


Рис. 2. Траектория движения объекта управления

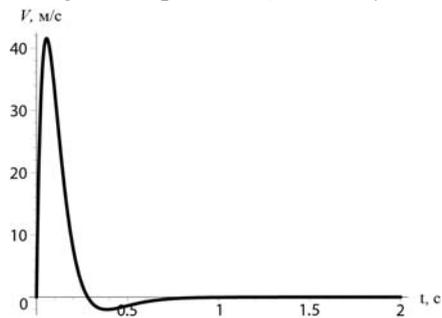


Рис. 3. Переходный процесс относительно линейной скорости

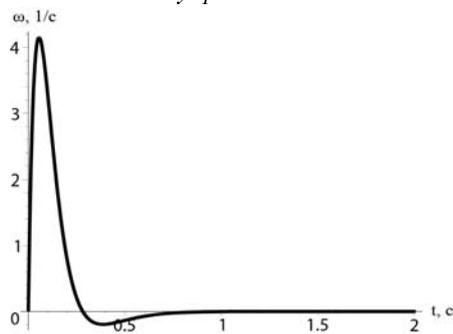


Рис. 4. Переходный процесс относительно угловой скорости

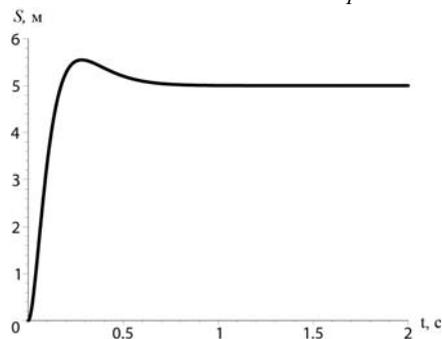


Рис. 5. Переходный процесс относительно линейного перемещения центра тяжести робота

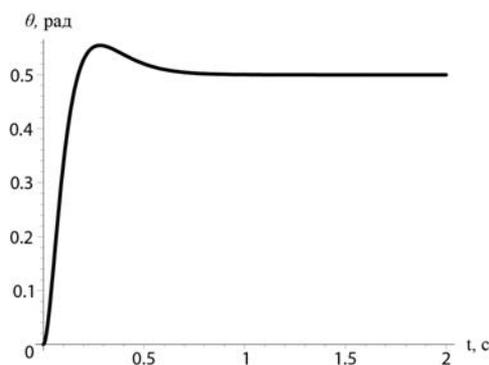


Рис. 6. Переходный процесс относительно углового перемещения центра тяжести робота

Представленные результаты моделирования подтверждают, что в синтезированной замкнутой системе управления (4), (6), (7), (18) обеспечивается выполнение введенной системы инвариантов (5). При этом обеспечивается асимптотически устойчивое поведение замкнутой системы относительно желаемого состояния и инвариантность к действию внешних возмущений.

Заключение. Таким образом, в статье получены важные научные результаты – разработана процедура аналитического синтеза универсальных законов векторного управления мобильным роботом на гусеничной основе с использованием полных нелинейных моделей движения. Указанные законы управления обеспечивают асимптотическую устойчивость замкнутой системы, инвариантность к внешним возмущениям. Это объясняется тем обстоятельством, что в основе синергетического подхода лежит базовый принцип асимптотического перехода от одного инвариантного многообразия к другому с последовательным понижением размерности многообразий [3–5]. При этом не возникает необходимости строгого соответствия параметров реального мобильного робота параметрам модели, заложенной в регулятор, необходимо лишь, чтобы замкнутая система попадала в область притяжения инвариантных многообразий, на которых обязательно поддерживается требуемое конечное состояние. В рамках данной работы предложены базовые алгоритмы управления механической подсистемой мобильного робота. Для построения полной системы управления в дальнейшем предполагается использование синергетического метода синтеза иерархических систем управления [6, 7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вонг Дж. Теория наземных транспортных средств. – М.: Машиностроение, 1982. – 284 с.
2. Забавников Н. А. Основы теории транспортных гусеничных машин. – М.: Машиностроение, 1975. – 448 с.
3. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
4. Колесников А.А. Синергетическая теория управления: концепции, методы, тенденции развития // Известия ТРТУ. – 2001. – № 5 (23). – С. 7-27.
5. Колесников А.А. Синергетическая концепция системного синтеза: единство процессов самоорганизации и управления // Известия ТРТУ. 2006. – № 6 (61). – С. 10-38.
6. Колесников А.А., Веселов Г.Е. Синергетический принцип иерархизации и аналитический синтез регуляторов взаимосвязанных электромеханических систем // Известия ТРТУ. – 2001. – № 5 (23). – С. 80–99.
7. Веселов Г.Е. Прикладная теория синергетического синтеза иерархических систем управления // Известия ТРТУ. – 2006. – № 5 (23). – С. 66-76.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.А. Терехов.

Скляров Андрей Анатольевич

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: s.andrey.88@mail.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: +79612957403.

Кафедра синергетики и процессов управления; аспирант.

Скляров Сергей Анатольевич

E-mail: predator86@mail.ru.

Тел.: +79034026114.

Кафедра синергетики и процессов управления; аспирант.

Scliarov Andrey Anatolevich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: s.andrey.88@mail.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +79612957403.

The Department of Synergetics and Control; Postgraduate Student.

Scliarov Sergey Anatolevich

E-mail: predator86@mail.ru.

Phone: +79034026114.

The Department of Synergetics and Control; Postgraduate Student.

УДК 629.7.05. 001.2

А.А. Колесников, В.А. Кобзев, А.И. Никитин

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЗАКОНОВ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОСАДКИ САМОЛЕТА*

Рассматривается синтез законов векторного управления системы автоматической посадки. Вначале проведен подробный анализ этапов посадки самолета и определена структура синтезируемой системы. Для каждого из этапов посадки определены цели управления. Синтез законов управления выполнен методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). Приведены подробные алгоритмы и соотношения для законов управления, а также результаты моделирования посадки самолета в условиях воздействия возмущений в виде бокового и встречного ветра.

Синтез; закон управления; автопилот; синергетическая теория управления; летательный аппарат; математическая модель.

A.A. Kolesnikov, V.A. Kobzev, A.I. Nikitin

SYNERGETICS SYNTHESIS OF VECTOR CONTROL LAWS FOR AIRCRAFT AUTOMATIC LANDING SYSTEM

We consider synthesis of vector control laws for automatic landing system. Firstly, we describe the analysis of landing phases and define the structure of landing system. Then we define control goals for each of landing phases. Control laws were designed by the method of analytical design of aggregated regulators (ADAR). Algorithms and equations for control laws, results of landing computer simulation under condition of wind perturbations are also presented.

Synthesis; control law; autopilot; synergetics control theory; aircraft; mathematics model.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-08-00252-а).