

УДК 621.86.033:004.896

Г.Е. Веселов, А.А. Скляр, С.А. Скляр

**СИНЕРГЕТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТРАЕКТОРНЫМ ДВИЖЕНИЕМ
ГУСЕНИЧНОГО РОБОТА***

Освещается проблема синтеза закона управления траекторным движением мобильного гусеничного робота. Для решения данной задачи в статье предлагается новый подход к синтезу систем управления гусеничными роботами, базирующийся на принципах и методах синергетической теории управления. Применение гусеничного шасси в данной работе обусловлено его высокой проходимостью за счет достаточно большой площади сцепления с поверхностью. Задача синергетического синтеза системы пространственного управления мобильным гусеничным роботом рассматривается с учетом анализа математической модели и специфики механизма поворота гусеничного шасси. В синергетической теории управления 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 статье в качестве условий, предъявляемым к синтезируемому закону управления, выступают асимптотически устойчивое движение робота по заданной траектории и постоянство контурной скорости.

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

G.E. Veselov, A.A. Scliarov, S.A. Scliarov

**SYNERGISTIC CONTROL OF THE TRAJECTORY MOVEMENT
OF TRACKED ROBOT**

This paper explores the problem of synthesis of synergetic control of trajectory movement of mobile tracked robot. To solve this problem in article presents new approach to tracked mobile robot control based on principals and methods of synergetic control theory. In this paper application of tracked chassis conditioned by it high passability, which is reached by having a sufficiently large area of adhesion with surface. The task of the synergetic synthesis of spatial control system of tracked mobile robot is considered with the analysis of mathematic model and specifics of tracked chassis rotation. In the theory of synergetic control the set of criteria for the control system is usually expressed in the form of an appropriate system of invariants. Invariants play the role of control objectives, they enforced a given technological problem, and the synergetic synthesis procedure reduces to process of finding control laws, which these given invariants are satisfied. At this paper as imposed condition on synthesized control law, serve an asymptotically stable motion of the robot along a given trajectory and constancy of contour speed.

Mobile robot; tracked chassis; invariants; trajectory movement; 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. В условиях плохой проходимости гусеничное шасси имеет ряд преимуществ относительно остальных видов шасси. Мобильные гусеничные роботы (МГР) имеют небольшое удельное давление на грунт, что дает им возможность передвигаться по болотистым местам и по снегу. Мощность двигателя у данного вида шасси более эффективно реализуется в тяговом усилии.

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

Для данной работы был разработан МГР, представленный на рис. 1, приводящийся в движение щеточными электромоторами, которые позволяют ему развивать скорость до 30 сантиметров в секунду. Для определения внешнего и внутреннего состояния МГР был оснащен инерциальным датчиком (акселерометром), магнитометром, закрепленным на двух сервоприводах датчиком определения расстояния, а также двумя видеокамерами с разрешающей способностью 352×288 пикселей. В качестве управляющего устройства используется 32-битный микроконтроллер NXP LPC2387, а управление моторами происходит через контроллер моторов, генерирующий ШИМ-сигнал. Также в работе имеется Bluetooth-модуль для ручного управления и передачи информации от датчиков на персональный компьютер.

Для реализации траекторного управления данным роботом в статье предлагается использовать принципы и методы синергетической теории управления (СТУ) [1–3].

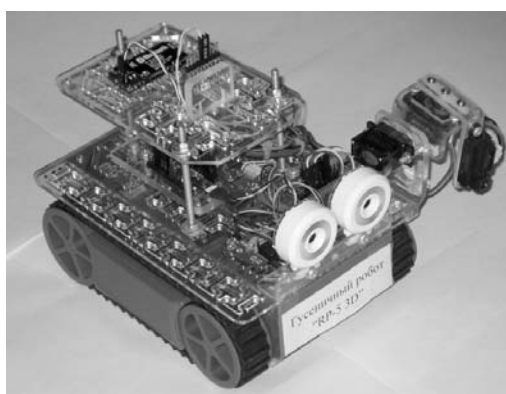


Рис. 1. Макет гусеничного робота

Математическая модель и постановка задачи управления. При повороте мобильного робота 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 МГР с использованием проскальзывания зависит от тяговых сил на забегающей F_0 и отстающей F_i гусеницах, результирующего сопротивления R_r , момента сопротивления повороту M_r , приложенного к гусенице со стороны грунта, и параметров машины (рис. 2).

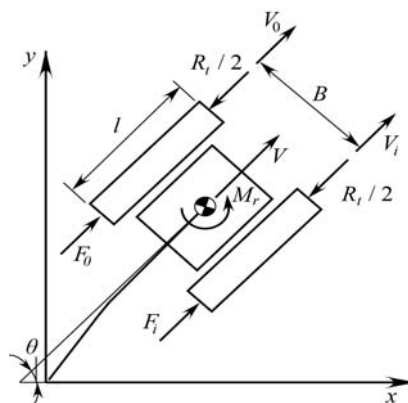


Рис. 2. Схема поворота со скольжением гусениц

Так как МГР имеет малую скорость передвижения, то центробежной силой можно пренебречь, при этом режим движения описывается следующей системой дифференциальных уравнений [4, 5]

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

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.

Таким образом, задачей синтеза является проектирование координирующей стратегии управления тяговыми силами на забегающей F_o и отстающей F_i гусеницах, обеспечивающей движение МГР по заданной траектории с заданной скоростью. Синтезированные стратегии управления силами являются задающими воздействиями для подсистем управления исполнительными приводами МГР [6–8]. В рамках статьи синтез локальных законов управления подсистемами исполнительных механизмов не рассматривается.

Процедура синтеза. В СТУ совокупность критериев управления принято выражать в виде соответствующей системы инвариантов [1–3, 6]. 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.

Первым условием, предъявляемым к синтезируемому закону управления, является осуществление перемещения МГР по заданной траектории, так как данный вид движения является основным при эксплуатации мобильных роботов [6–8]. Поэтому, согласно СТУ, в качестве первого инварианта в фазовом пространстве объекта системы выберем уравнение заданной траектории. Для простоты вычислений возьмем уравнение прямой:

$$y = kx,$$

в рабочих координатах МГР данное уравнение имеет следующий вид:

$$S \sin(\theta) = kS \cos(\theta).$$

Согласно процедуре синтеза, основным методом СТУ – методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [1–3, 6] – введем для объекта управления первую макропеременную

$$\Psi_1 = S \sin(\theta) - kS \cos(\theta). \quad (2)$$

Вторым условием, предъявляемым к синтезируемому закону управления, является постоянство контурной скорости при движении МГР по траектории $\Psi_1 = 0$, поэтому второй инвариант будет представляться следующим образом:

$$V = V_0,$$

где V_0 – желаемая контурная скорость МГР. Для выполнения данного инварианта необходимо ввести вторую макропеременную

$$\Psi_2 = V_0 - V. \quad (3)$$

Функциональные уравнения относительно введенных макропеременных Ψ_1 и Ψ_2 , определяющие, согласно методу АКАР [1–3, 6], динамические характеристики системы, записываются в виде дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} T_1 \ddot{\Psi}_1(t) + T_2 \dot{\Psi}_1(t) + \Psi_1 &= 0; \\ T_3 \dot{\Psi}_2(t) + \Psi_2 &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Совместное решение уравнений (2)–(4), с учетом математической модели МГР (1) приводит к получению синергетических законов управления F_0 и F_i :

$$F_i = \frac{1}{2B} \left(\frac{\sigma_3 \sigma_1 + \sigma_6}{\sigma_2} + \sigma_4 \right); \quad (5)$$

$$F_0 = -\frac{1}{2B} \left(\frac{\sigma_3 \sigma_1 + \sigma_6}{\sigma_2} + \sigma_5 \right), \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{d\Psi_1}{dS}, \quad \sigma_2 = \frac{d\Psi_1}{d\theta}, \quad \sigma_3 = -2I_z T_3 V + 2T_1 I_z V + 2I_z T_3 V_0, \\ \sigma_4 &= BR_t - mBT_3 V - 2M_r + BR_t + mBT_3 V_0 + 2T_1 I_z \omega, \\ \sigma_5 &= -BR_t + mBT_3 V - 2M_r - BR_t - mBT_3 V_0 + 2T_1 I_z \omega, \\ \sigma_6 &= 2V^2 I_z \frac{d^2 \Psi_1}{dS^2} + 4VI_z \frac{d^2 \Psi_1}{d\theta dS} \omega + 2\omega^2 I_z \frac{d^2 \Psi_1}{d\theta^2} + 2T_2 I_z \Psi_1. \end{aligned}$$

Таким образом, синтезирован регулятор, обеспечивающий устойчивое движение МГР по выбранной траектории с заданной контурной скоростью.

Компьютерное моделирование замкнутой системы. Проведем компьютерное исследование синтезированной замкнутой системы управления МГР. На рис. 3–7 представлены результаты моделирования при следующих параметрах:

- ◆ возмущений внешней среды: $R_t = 0,1$, $M_r = 0,1$;
- ◆ механизма $m = 0,7$ кг, $I_z = 0,001$ кг · м², $B = 0,12$ м;
- ◆ регулятора $V_0 = 10$, $T_1 = 10$, $T_2 = 10$, $T_3 = 10$, $k = 2$.

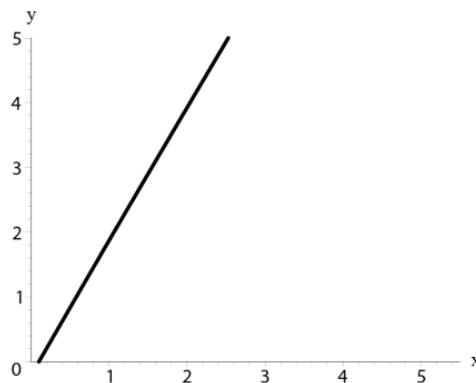


Рис. 3. Траектория движения объекта управления

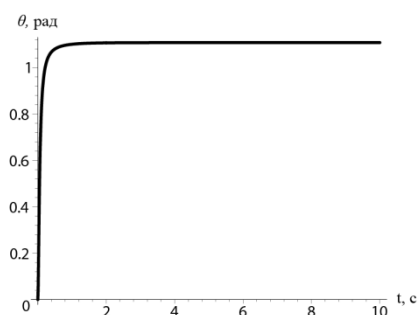


Рис. 4. Угловое перемещение центра тяжести робота

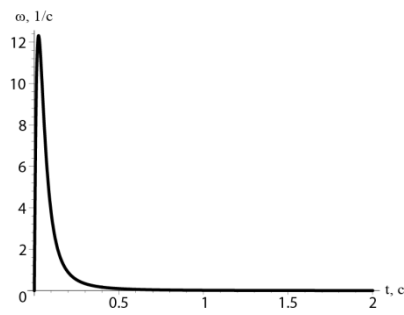


Рис. 5. Угловая скорость робота

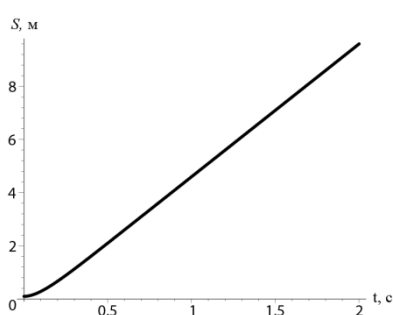


Рис. 6. Линейное перемещение центра тяжести робота

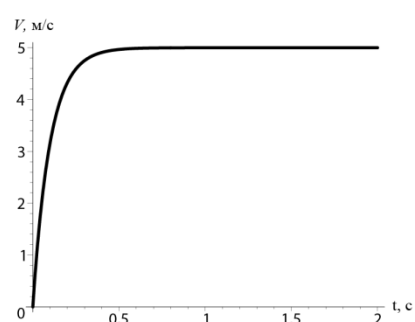


Рис. 7. Линейная скорость

Представленные результаты моделирования подтверждают, что в синтезированной замкнутой системе управления (1), (5), (6) обеспечивается выполнение введенной системы инвариантов.

Реализация стратегии управления. Синтезированный закон управления применен в мобильном гусеничном роботе, представленном на рис. 1. В созданном роботе информация из датчиков поступает в центральный микроконтроллер LPC2387, где обрабатывается, используя синергетический закон управления (5), (6). Сформированное управляющее воздействие поступает на щеточные электромоторы гусеничного шасси посредством контроллера моторов. Одновременно происходит передача данных о состоянии мобильного робота на персональный компьютер.

Для определения и обхода по заданной траектории не преодолимых данным видом шасси препятствий в макете использованы такие средства обратной связи, как лазерный дальномер и видеокамеры (рис. 8). Лазерный дальномер имеет две степени свободы, так как закреплен на двух сервоприводах. Его основное назначение – определять точное расстояние от робота до объектов внешней среды. Данная операция занимает достаточно много времени, поэтому робот дополнительно оснащен двумя видеокамерами, восстанавливающими трехмерную сцену внешней среды по стереопаре, используя алгоритмы фотограмметрии.

Имея информацию о начальных условиях (вектор состояния в начальный момент времени) и получая измерения ускорений по трем осям, центральный контроллер вычисляет пройденное расстояние и скорость робота путём интегрирования. Угловая скорость вычисляется дифференцированием показаний магнитометра по времени. Вектор состояния робота обновляется в каждый момент времени, когда приходят измерения с датчиков (рис. 9).

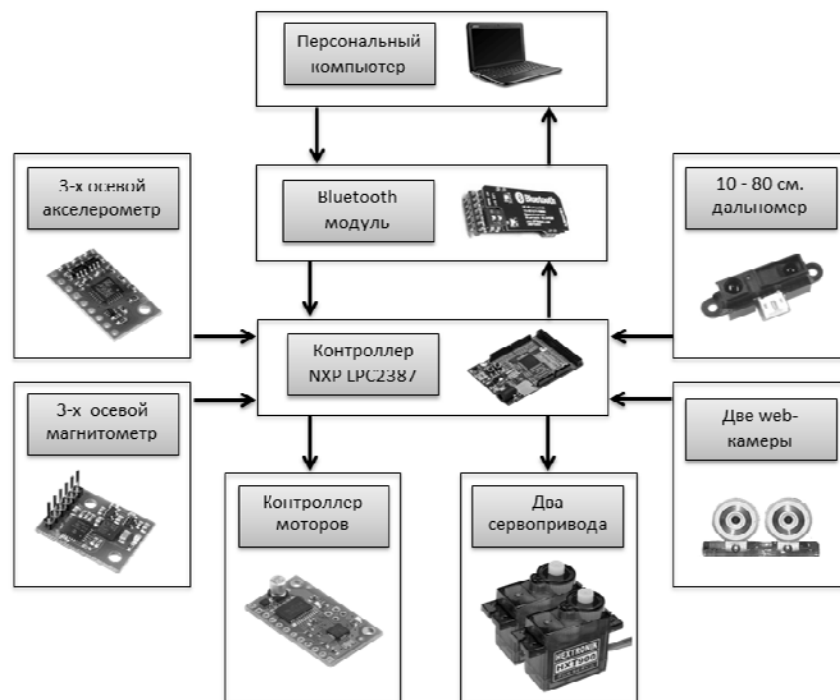


Рис. 8. Схема взаимодействия устройств мобильного робота

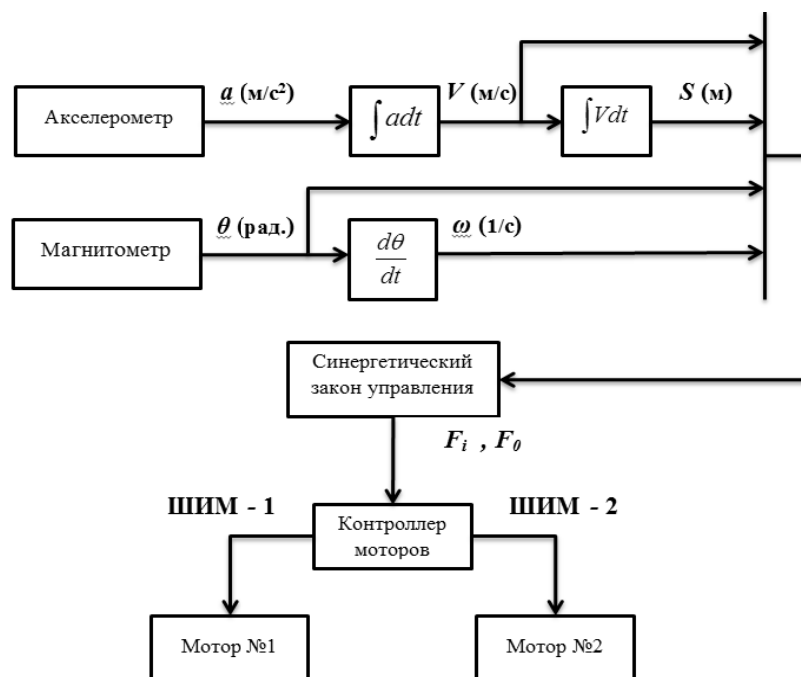


Рис. 9. Структурная схема процесса управления гусеничным роботом

Заключение. Таким образом, в статье представлены важные научные результаты – разработана процедура аналитического синтеза координирующей стратегии векторного управления мобильным роботом на гусеничной основе с использованием полных нелинейных моделей движения. Указанная стратегия управления обеспечивает асимптотическую устойчивость замкнутых систем и четкое исполнение заданных инвариантов. Представленный синергетический закон управления не учитывает случайные внешние возмущения, однако наблюдение возмущений возможно с использованием метода синергетического синтеза адаптивных систем управления [1], но в рамках статьи процедура синтеза не приводится.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
2. Колесников А.А. Синергетическая теория управления: концепции, методы, тенденции развития // Известия ТРТУ. – 2001. – № 5 (23). – С. 7-27.
3. Колесников А.А. Синергетическая концепция системного синтеза: единство процессов самоорганизации и управления // Известия ТРТУ. – 2006. – № 6 (61). – С. 10-38.
4. Вонг Дж. Теория наземных транспортных средств. – М.: Машиностроение, 1982. – 284 с.
5. Забавников Н. А. Основы теории транспортных гусеничных машин. – М.: Машиностроение, 1975. – 448 с.
6. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Мушенко А.С. и др. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы. – М.: КомКнига, 2006. – 304 с.
7. Веселов Г.Е. Синергетический подход к синтезу иерархических систем управления // Известия ТРТУ. – 2006. – № 6 (61). – С. 73-84.
8. Kondratiev I., Dougal R., Veselov G., Kolesnikov A. Hierarchical control for electromechanical systems based on synergetic control theory // Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications 2009, CCA '09. – Saint Petersburg. – 2009. – P. 495-500.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.М. Першин.

Веселов Геннадий Евгеньевич – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: deanfib@tti.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: 88634360450; факультет информационной безопасности; декан.

Скляр Андрей Анатольевич – e-mail: s.andrey.88@mail.ru; 347900, тел.: +79612957403; кафедра синергетики и процессов управления; аспирант.

Скляр Сергей Анатольевич – e-mail: predator86@mail.ru; тел.: +79034026114; кафедра синергетики и процессов управления; аспирант.

Veselov Gennady Evgen'evich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: deanfib@tti.sfedu.ru; 2, Chekhov street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634360450; college of informational security; Dean.

Scliarov Andrey Anatolevich – e-mail: s.andrey.88@mail.ru; 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.