

## Синергетический метод управления гусеничной платформой

*О.Г. Межаков*

*Южный федеральный университет, г. Таганрог, Ростовская область*

**Аннотация:** Освещается проблема синтеза закона регулирования скорости и угла поворота гусеничной платформы с электроприводами постоянного тока в недетерминированной среде. Решение поставленной задачи достигается применением синергетического регулятора с иерархическим принципом управления. Управление гусеничной платформой рассматривается на базе математической модели движения платформы и электроприводов.

**Ключевые слова:** синергетическая теория управления, метод АКАР, иерархический метод, интегральная адаптация, гусеничная платформа, электропривод постоянного тока.

### Введение

Развитие полупроводниковой индустрии в конце 20 начало 21 века позволило применить роботов на гусеничном ходу в областях, где жизнедеятельность человека затруднена, например, в условиях радиоактивного и химического загрязнения. Управление гусеничной платформой (ГП) выполняется дистанционно оператором или в автоматическом режиме с помощью датчиков ориентации в пространстве [1, 14, 20]. Силовые установки, приводящие в движение ГП, выбираются исходя из поставленных задач и массогабаритных размеров платформы. В результате ГП является сложной технической системой, которую можно представить в виде иерархически связанных управляемых подсистем [8]. Функционирование любой подсистемы оказывается под воздействием подсистемы вышеразмещенного уровня. Другими словами, это вертикально расположенные взаимодействующие подсистемы с исполнительным, тактическим и стратегическим уровнями. Управление сложной технической системой осложняется большим числом координат состояния. В результате синтез технической системы, гусеничная платформа, в недетерминированной среде с помощью традиционных регуляторов

---

становиться практически неразрешимой задачей. Синергетическая теория управления (СТУ), базирующаяся на принципе «расширения - сжатия» фазового пространства, позволяет рассматривать сложную техническую систему с большим числом координат состояния [5-10]. Рассмотрим синтез регулятора стабилизации углового перемещения и скорости движения ГП с двумя электроприводами постоянного тока в недетерминированной среде с помощью основного метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) синергетической теории управления профессора А.А.Колесникова.

### Математическая модель и синтез регулятора.

Синтез регулятора методом АКАР базируется на математической модели объекта управления, что позволяет учитывать физические особенности объекта управления. Составим динамическую систему дифференциальных уравнений движения ГП на плоскости, Рис. 1.

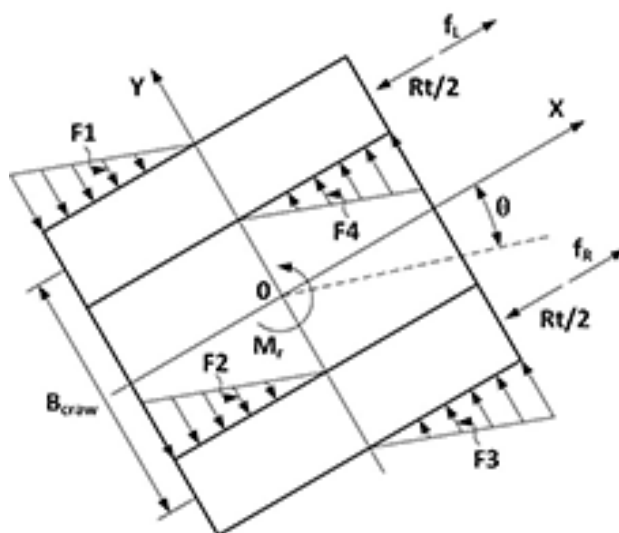


Рис. 1 – Схема сил и моментов, действующих на ГП при движении

$$\begin{aligned}\dot{x} &= V \cos \theta; \\ \dot{y} &= V \sin \theta; \\ \dot{\theta} &= \omega; \\ m\dot{V} &= F_T - R_t; \\ I_z \dot{\omega} &= M_T - M_r; \\ \dot{\omega}_{fl} &= \frac{k_{tl} i_{al} - B_l \omega_{fl} - T_{ll}}{J_l}; \\ \dot{i}_{al} &= \frac{-R_{al} i_{al} - k_{tl} \omega_{fl} + U_{al}}{L_{al}}; \\ \dot{\omega}_{fr} &= \frac{k_{tr} i_{ar} - B_r \omega_{fr} - T_{lr}}{J_r}; \\ \dot{i}_{ar} &= \frac{-R_{ar} i_{ar} - k_{tr} \omega_{fr} + U_{ar}}{L_{ar}};\end{aligned}\tag{1}$$

где  $x, y$  – координаты центра тяжести ГП;  $\theta$  – угловое перемещение ГП;  $V$  – линейная скорость ГП;  $\omega$  – угловая скорость ГП;  $B_{craw}$  – колея ГП (расстояние между центральными линиями гусениц);  $R_t$  – коэффициент продольного сопротивления;  $M_T$  – момент сопротивления повороту;  $m$  – масса ГП;  $I_z$  – момент инерции массы ГП относительно вертикальной оси, проходящей через мгновенный центр скоростей ГП;  $R_{al}, R_{ar}$  – сопротивление обмотки якоря;  $i_{al}, i_{ar}$  – ток якоря;  $k_{tl}, k_{tr}$  – постоянная момента зависящая от плотности тока в постоянных магнитах;  $\omega_{fl}, \omega_{fr}$  – угловая скорость вращения вала двигателя;  $B_l, B_r$  – коэффициент затухания;

$T_{Ll}, T_{Lr}$  – крутящий момент механической нагрузки;  $J_r$  – инерция ротора;  
 $L_{al}, L_{ar}$  – индуктивность катушки якоря;  $U_{al}, U_{ar}$  – напряжение, возникающее на обмотках возбуждения.

В системы дифференциальных уравнений (1), сила тяги  $F_T$  определяется, суммой сил тяг правой гусеницы  $f_r$  и левой гусеницы  $f_l$ . Совершение поворота ГП осуществляется уменьшением силы тяги на одной из гусениц, возникает вращающий момент  $M_T$ , в следствии чего создается момент сопротивления повороту  $M_T$ . В результате вращающий момент  $M_T$  определяется как:

$$M_T = \frac{-B_{craw}(f_r - f_l)}{2}$$

Варьируя значениями  $f_r$  и  $f_l$ , которые являются каналами управления, осуществляется перемещение ГП в нужном направлении с требуемой скоростью.

Во время движения ГП могут возникать внешние не определенные возмущения, стремящиеся к выводу из устойчивого состояния динамическую систему. С целью парирование возмущающих воздействий и сохранение заданных параметров движения применим метод интегральной адаптации [7]. Данный метод заключается в построении «гарантирующего регулятора», обеспечивающего компенсацию возмущений и реализовывает астатический закон управления. Введем два интегратора, расширяющие систему (1):

$$\dot{z}_1 = \eta_1(V + V_0);$$

$$\dot{z}_2 = \eta_2(\theta + \theta_0);$$

где  $V_0, \theta_0$  – желаемые значения скорости и углового перемещение ГП;

$\eta_{1,2}$  – постоянный коэффициент.

Систему уравнений (1) можно представить в виде двух подсистем: подсистема движения и подсистемы приводов [8]. В результате образуется иерархическая система, в которой для связи между уровнями сформируем цели управления  $\omega_{i0} = \omega_{i0}^*$ , и введем соответствующие уравнения связи:

$$z'_{2i} = \eta_{2i}(\omega_i - \omega_{i0});$$

где  $i$  – индекс левого и правого двигателя постоянного тока

Силы тяги  $f_r$  и  $f_l$  являются каналами управления подсистемы движения

ГП, которые можно представить в следующем виде:

$$f_{r,l} = \frac{M}{r};$$

$$M = \varepsilon \omega_{r,l}$$

где  $M$  – момент вращения на выходном валу;  $\omega_{r,l}$  – угловая скорость вращения правой и левой ведущей шестерни;  $\varepsilon$  – коэффициент редуктора двигателя постоянного тока,  $r$  – радиус шестерни.

Запишем итоговую систему дифференциальных уравнений движения ГП с учетом выше сказанного:

$$\dot{V} = \frac{\varepsilon(\omega_l + \omega_r)}{rm} - z_1;$$

$$\theta = \omega;$$

$$\dot{\omega} = -\frac{1}{2} \frac{\varepsilon(\omega_l - \omega_r) B_{срав}}{rI_z} - z_2$$

$$z_1 = \eta_1(V - V_0);$$

(2)

$$\begin{aligned} \dot{z}_2 &= \eta_2(\theta - \theta_0); \\ \dot{i}_{at} &= \frac{-R_{at}i_{at} - k_{vt}\omega_t + U}{L_{at}}; \\ \dot{\omega}_t &= \frac{k_{ct}i_{at} - B_t\omega_t}{J_t} - z_{2t}; \\ \dot{z}_{2t} &= \eta_{2t}(\omega_t - \omega_{10}); \end{aligned}$$

Согласно методу АКАР вводим первую макропеременную, обеспечивающую выполнение  $V_0$ :

$$\psi_1 = V - V_0 - z_1; \quad (3)$$

По условиям метода АКАР [7] макропеременная (3) должна удовлетворять решению  $\psi_1 = 0$  основного функционального уравнения, что обеспечит выполнение асимптотической устойчивости системы (2):

$$T_n \dot{\psi}_n(t) + \psi_n = 0 \quad (4)$$

Совместно решаем уравнения (3) и (4):

$$T_1 \left( \frac{\varepsilon(\omega_t - \omega_r)B_{срав}}{r\pi} - z_1 - \eta_1(V - V_0) \right) + V - V_0 - z_1 = 0 \quad (5)$$

Воспользуемся основным функциональным уравнением второго порядка и введем вторую макропеременную выполнения инварианта угла поворота:

$$T_n^2 \ddot{\psi}_n(t) + T_m \dot{\psi}_n + \psi_n = 0 \quad (6)$$

$$\psi_2 = \theta - \theta_0 + z_2; \quad (7)$$

Совместно решаем уравнения (6) и (7):

$$T_2^2 \left( -\eta_2 \omega - \frac{1}{2} \frac{\varepsilon(\omega_l - \omega_r) B_{craw}}{r I_x} - z_2 \right) + T_2(\omega - \eta_2(\theta - \theta_0)) + T_4(\theta - \theta_0 - z_2) = 0 \quad (8)$$

Из совместного решение уравнений (5) и (8) выразим угловую скорость вращения левого и правого электродвигателя постоянного тока:

$$\begin{aligned} \omega_r = & \frac{1}{2} r (2G_1 \eta_2 \omega I_x + T_2^2 B_{craw} z_1 m + 2G_1 z_1 I_x - 2G_2 I_x \omega + 2G_2 I_x \eta_2 \theta - \\ & - 2G_2 \eta_2 \theta_0 - 2T_1 T_4 I_x \theta + 2T_1 T_4 I_x \theta_0 + 2T_1 T_4 I_x z_2 - G_1 B_{craw} \eta_1 m V_0 + \\ & + G_1 B_{craw} z_1 m + G_1 B_{craw} \eta_1 m V - T_2^2 B_{craw} V m + T_2^2 B_{craw} V_0 m) / (G_1 \varepsilon B_{craw} \\ \omega_l = & -\frac{1}{2} r (G_1 \eta_1 m B_{craw} V_0 + 2G_1 \eta_2 \omega I_x - T_2^2 B_{craw} z_1 m + 2G_1 z_2 I_x - \\ & - 2G_2 \omega + 2G_2 \eta_2 \theta - 2G_2 \eta_2 \theta_0 - 2T_1 T_4 I_x \theta + 2T_1 T_4 I_x \theta_0 + 2T_1 T_4 I_x z_2 - \\ & G_1 B_{craw} \eta_1 m V + T_2^2 B_{craw} V m - T_2^2 B_{craw} V_0 m) / (G_1 \varepsilon B_{craw}) \end{aligned}$$

где

$$G_1 = T_1 T_2^2, G_2 = T_1 T_3 I_x$$

Проведем синтез управляющего воздействия подсистемы дифференциальных уравнений электродвигателя постоянного тока:

$$\dot{i}_{at} = \frac{R_{at} i_{at} - k_{vt} \omega_t + U}{L_{at}};$$

$$\dot{\omega}_t = \frac{k_{ct} i_{at} - B_t \omega_t - z_{3t} i}{J_t}$$

$$z_{3t} = \eta_{3t} (\omega_t - \omega_{t0});$$

Введем первую макропеременную:

$$\psi_1 = i_{at} - \varphi_1(\omega_t, z_{3t}) \quad (9)$$

Решая основное функциональное уравнение (4) совместно с (9) найдем

внутренний закон управления:

$$U_i = (T_{1i}G_1L_{ai}k_{ti}i_{ai} - T_{1i}G_1L_{ai}B_i\omega_i - T_{1i}G_1L_{ai}z_{3i}J_i + T_{1i}J_iR_{ai}i_{ai} + \\ + T_{1i}J_i k_{vi}\omega_i + T_{1i}G_2\eta_{3i}J_iL_{ai}\omega_i - T_{1i}G_2\eta_{3i}J_iL_{ai}\omega_{0i} - i_{ai}J_iL_{ai} - \\ - \varphi_1(\omega_i, z_{3i}))/ (T_{1i}J_i) \quad (10)$$

Где

$$G_1 = \frac{d}{d\omega_i} \varphi_1(\omega_i, z_{3i}), G_2 = \frac{d}{dz_{3i}} \varphi_1(\omega_i, z_{3i})$$

В результате попадания системы в окрестность многообразия  $\psi_1 = 0$  (10) в системе происходит динамическая декомпозиция:

$$\dot{\omega}_i = \frac{k_{ti}\varphi_1(\omega_i, z_{3i}) - B_i\omega_i}{J_i} - z_{3i} \\ z'_{3i} = \eta_{3i}(\omega_i - \omega_{0i})$$

Введем вторую макропеременную обеспечивающую выполнение заданного инварианта  $\omega_{fi}$  или  $\omega_{fi}$ :

$$\psi_2 = \omega_i - \omega_{i0} - z_{3i}; \quad (11)$$

Решая основное функциональное уравнение (4) и уравнение (11) выразим  $\varphi_1(\omega_i, z_{3i})$ :

$$\varphi_1(\omega_i, z_{3i}) = \frac{T_2B\omega_i + T_2z_{3i}J + T_2\eta_{3i}J\omega_i - T_2\eta_{3i}J\omega_{i0} - \omega_iJ + \omega_{i0}J + z_{3i}J}{T_2k_{ti}} \quad (12)$$

Результат уравнения (12) необходимо подставить в уравнение (10), чтобы найти закон управления электродвигателя постоянного тока.

Проведем моделирование системы дифференциальных уравнений (1) с полученным иерархическим регулятором стабилизации углового перемещения и скорости движения ГП в системе «Matlab Simulink» с применением блока «Matlab Function». Результаты моделирования



представлены на Рис. 2-4.

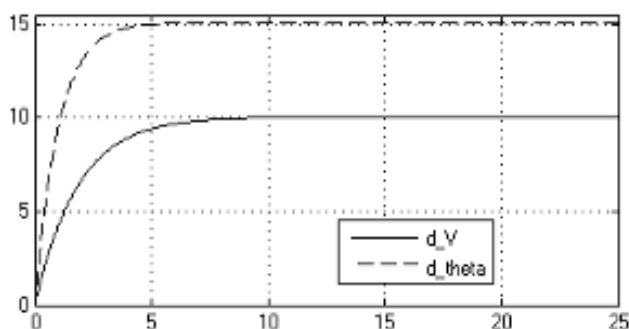


Рис. 2 –  $V = 10, \theta = 15$

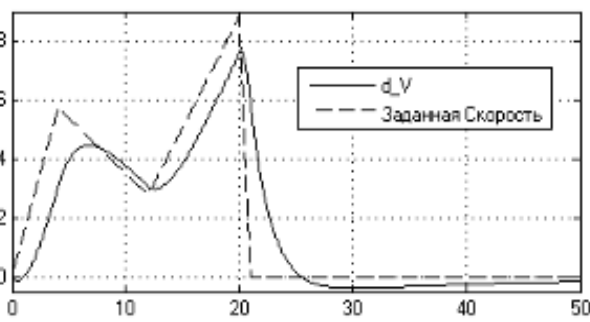


Рис. 3 –  $V = f_t, \theta = 0$

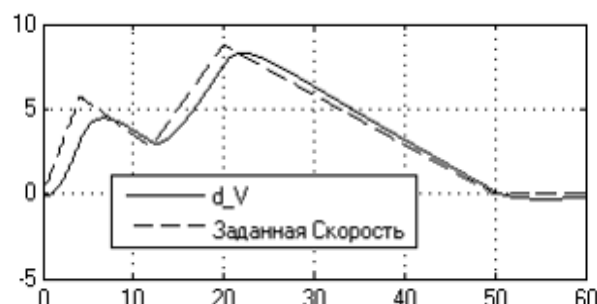
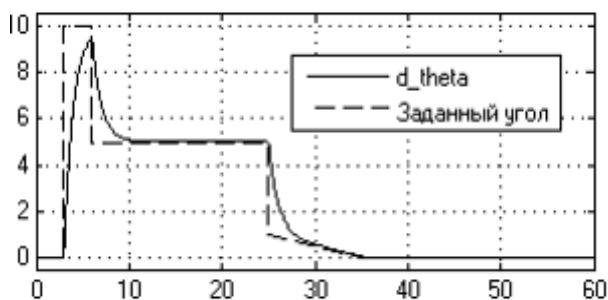


Рис. 4 –  $\theta = f(t), V = f(t)$

### Заключение

По результатам моделирования можно заключить, что предложенный метод АКАР для синтезирования законов управления ГП с большим числом координат состояния, полностью удовлетворяет поставленным целям. Применение интегральной адаптации позволяет нивелировать влияние внешних не измеряемых возмущений как в подсистеме движения ГП, так и в подсистеме электродвигателей. Представление ГП в виде иерархически связанных подсистем дает возможность учитывать динамику подчиненных подсистем и их физические особенности.

### Литература

1. Батанов А.Ф., Грицынин С.Н., Муркин С.В. Робототехнические системы для применения в условиях чрезвычайных ситуациях // Специальная техника. 2000. №3. URL: [loi.sscs.ru/bdm/bigdog/crobots.htm](http://loi.sscs.ru/bdm/bigdog/crobots.htm) (дата доступа 01.04.2017).
  2. Анилович В.Я., Водолажченко Ю.Т. Конструирование и расчет сельскохозяйственных тракторов: справочный пособие. 2-е издание, переработ. и доп. М.: Машиностроение, 1976. 456 с.
  3. Антонов А.С. Силовые передачи колёсных и гусеничных машин. Теория и расчёт. 2-е издание., перераб. и доп. Л.: Машиностроение (Ленингр. отделение), 1975. 480 с.
  4. Антонов А.С., Благодрагов А.И., Бинович Я.Е. [и др.] Танки. Основы теории и расчета. М.: ОНТИ, 1937. 436 с.
  5. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н. [и др.] Синергетическая теория управления нелинейными взаимосвязанными электромеханическими системами // Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. С. 7-43
  6. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. М.: КомКнига, 2006. 240 с. С. 82-175
  7. Колесников А.А. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления. Ч. 2. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. 558 с.
  8. Веселов Г.Е. Синергетический подход к синтезу иерархических систем управления // Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006, С. 73-84
  9. Колесников А.А., Попов А.Н. Синергетическое управление нелинейными электроприводами II. Векторное управление электроприводами постоянного тока // Электромеханика. 2006. №1. С.6-17.
  10. Колесников А.А. Оптимальное по быстродействию управление электроприводом постоянного тока в функции угла поворота // Известия вузов СССР. Энергетика. 1967. №11. С. 39-44.
-

11. Топчиев Б.В. Аналитическое конструирование агрегированных регуляторов: управление мобильным роботом // Сборник докладов на всероссийской научной конференции "Управление и информационные технологии". СПб.: Наука. 2003. №1. С. 72-76.

12. Космачёв П.В. Анализ конструктивных схем движителей транспортных средств робототехнических комплексов для выполнения антитеррористических операций // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды IX Всероссийской научно-практической конференции СПб.: НПО Специальных материалов, Т. 5: Экстремальная робототехника. 2006. С. 607-615.

13. Guarnieri M. A, R. Kurazume, H. Masuda. Team of Tracked Robots for Special Urban Search and Rescue Operations // International Conference on Intelligent Robots and Systems, St. Louis, USA, Oct 11- 15, 2009. PP. 2795-2800.

14. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н. [и др.] Синергетическое управление нелинейными электромеханическими системами. М.: Фирма «Испо-Сервис», 2000. 248 с. С. 7-84.

15. Дуньюэ Ц. Управление мобильным роботом на основе нечетких моделей // Современные проблемы науки и образования. 2007. №1. С. 58-65.

16. Александров В.В. Оптимальное управление движением. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 376 с. С. 9-35

17. Антонов А.С., Благонравов А.И., Бинович Я.Е. [и др.] Танки. Основы теории и расчета. М.: ОНТИ, 1937. 436 с.

18. Moosavian S. A., Kalantari Experimental Estimation for Exact Kinematics Modelling and Control of a Tracked Mobile Robot // International Conference on Intelligent Robots and Systems, Nice, France, Sept., 22-28, 2008. pp. 95-100.

19. Гуськов В.В., Велев Н.Н, Атаманов Ю.Е [и др.] Тракторы. Теория. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.

---

20. Шегельман И.Р., Скрыпник В.И. О потенциале гусеничных движителей лесных машин. // Инженерный вестник Дона. 2014. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2231.

21. Чачхиани Т.И., Серова М.Г. Мобильный робот в нестационарной среде. // Инженерный вестник Дона. 2017. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4546.

### References

1. Batanov A.F., Gricynin S.N., Murkin S.V. Specialnaya tehnika. 2000. №3. URL: loi.ssc.ru/bdm/bigdog/crobots.htm (data dostupa 01.04.2017).

2. Anilovich V.Ya., Vodolazhchenko Yu.T. Konstruirovaniye i raschet selskohozyajstvennykh traktorov: spravochnyj posobie [Design and calculation of agricultural tractors: reference manual]. 2-e izdanie, pererabot. i dop. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 456 p.

3. Antonov A.S. Silovye peredachi kolyosnyh i gusenichnyh mashin. Teoriya i raschyot [The power transmission of wheeled and tracked vehicles. Theory and calculation]. 2-e izdanie., pererab. i dop. L.: Mashinostroenie (Leningr. otделение), 1975. 480 p.

4. Antonov A.S., Blagonravov A.I., Binovich Ya.E. [i dr.] Tanki. Osnovy teorii i rascheta [Tanks. Fundamentals of theory and calculation]. Moscow: ONTI, 1937. 436 p.

5. Kolesnikov A.A., Veselov G.E., Popov A.N. [i dr.]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000. pp. 7-43.

6. Kolesnikov A.A. Sinergeticheskie metody upravleniya slozhnymi sistemami: teoriya sistemnogo sinteza [Synergetic methods of complex systems control: system synthesis theory]. Moscow: KomKniga, 2006. 240 p. pp. 82-175.

7. Kolesnikov A.A. Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya: Sinergeticheskij podhod v teorii upravleniya. CH. 2. [Modern Applied

Management Theory: A Synergetic Approach in Management Theory. Part 2.]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000. 558 p.

8. Veselov G.E. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2006. pp. 73-84.
  9. Kolesnikov A.A., Popov A.N. Elektromekhanika. 2006. №1. pp. 6-17.
  10. Kolesnikov A.A. Izvestiya vuzov SSSR. Energetika. 1967. №11. pp. 39-44.
  11. Topchiev B.V. Sbornik dokladov na vserossijskoj nauchnoj konferencii "Upravlenie i informacionnye tehnologii". Saint-Petersburg: Nauka. 2003. №1. pp. 72-76.
  12. Kosmachyov P.V. Aktualnye problemy zashity i bezopasnosti: Trudy IX Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii Saint-Petersburg.: NPO Specialnyh materialov, T. 5: Ekstremalnaya robototekhnika. 2006. pp. 607-615.
  13. Guarnieri M. A, R. Kurazume, H. Masuda. Team of Tracked Robots for Special Urban Search and Rescue Operations. International Conference on Intelligent Robots and Systems, St. Louis, USA, Oct 11- 15, 2009. pp. 2795-2800.
  14. Kolesnikov A.A., Veselov G.E., Popov A.N. [i dr.] Sinergeticheskoe upravlenie nelinejnymi jelektromekhanicheskimi sistemami [Synergetic control of nonlinear electromechanical systems]. Moscow: Firma «Ispo-Servis», 2000. 248p. pp. 7-84.
  15. Dunyue C. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2007. №1. pp. 58-65.
  16. Aleksandrov V.V. Optimalnoe upravlenie dvizheniem [Optimal motion control]. Moscow: FIZMATLIT, 2005. 376 p. pp. 9-35.
  17. Antonov A.S., Blagonravov A.I., Binovich Ya.E. [i dr.] Tanki. Osnovy teorii i rascheta [Tanks. Fundamentals of theory and calculation]. Moscow: ONTI, 1937. 436 p.
  18. Moosavian S. A., Kalantari Experimental Estimation for Exact Kinematics Modelling and Control of a Tracked Mobile Robot. International
-



Conference on Intelligent Robots and Systems, Nice, France, Sept., 22-28, 2008.  
pp. 95-100.

19. Guskov V.V., Velev N.N, Atamanov Yu.E [i dr.] Traktory. Teoriya [Tractors. Theory]. Moscow: Mashinostroenie, 1988. 376 p.

20. Shegel'man I.R., Skrypnik V.I. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2014. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2231](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2231).

21. Chachkhiani T.I., Serova M.G. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2017. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4546](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4546).