



11. Pogodin V.K. et al. Opredelenie trebuemykh silovykh vozdествii dlya obespecheniya germetichnosti v truboprovodnoi armature na vysokie parametry [The determination of the required power effects to ensure tightness in pipeline fittings for high parameters]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2013. No. 3 (19). Pp.76–83.
12. Pogodin V.K., Ogar P.M., Vainapel' Yu.L. Eksperimental'naya otsenka bezopasnogo resursa raboty zatvornogo uzla truboprovodnoi armatury po kriteriyu germetichnosti [Experimental assessment of the safe service life of the valve assembly of the pipeline fittings by the tightness criterion]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2014. No. 1 (21). Pp. 33–37.
13. Livshits V.I. Issledovanie i razrabotka norm rascheta i konstruirovaniya del'ta-zatvora dlya sosudov vysokogo davleniya : dis. ... kand. tekhn. nauk [Research and development of standards for the calculation and designing of the delta-gate for high-pressure vessels: a Ph.D. (Engineering) diss.]. Moscow: 1975, 168 p.
14. Pogodin V. K. Zapornye klapany na vysokie parametry ekspluatatsii. Issledovanie i proektirovanie [Shut-off valves for high parameters of operation. Research and designing]. Bratsk: BrGU Publ., 2016. 362 p.
15. Dolotov A.M., Gozbenko V.E., Belogolov Yu.I. Uplotnitel'nye soedineniya s ispol'zovaniem tonkostennykh elementov [Sealing joints using thin-walled elements]. Irkutsk, 2011. Dep. v VINITI 22.11.2011, No. 508-V2011.
16. Gozbenko V.E., Kargapol'tsev S.K., Minaev N.V., Karlina A.I. Simulation of the vibration of the carriage asymmetric parameters in Mathcad. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016. Vol. 11. No. 23. Pp. 11132–11136.
17. Birger I.A. Iosilevich G.V. Rez'bovye i flantsevye soedineniya [Threaded and flanged connections]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1990. 365 p.
18. Klyus V.P. Issledovanie osevoi zatyazhki krepezhnykh detalei zatvorov agregatov khimicheskikh proizvodstv: dis. ... kand. tekhn. nauk [Research of axial tightening of fasteners for valves in chemical industry: a Ph.D. (Engineering) diss.]. Moscow, 1980. 212 p.

### Информация об авторах

### Authors

Погодин Валерий Константинович – д. т. н., профессор, АО ИркутскНИИХиммаш, г. Иркутск, e-mail: v.pogodin@himmash.ru

Valerii Konstantinovich Pogodin – Doctor of Engineering Science, Professor, JSC IrkutskNIKhimmash, Irkutsk, e-mail: v.pogodin@himmash.ru

Белоголов Юрий Игоревич – к. т. н., доцент кафедры управление эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: pr-mech@mail.ru

Yurii Igorevich Belogolov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor at the Subdepartment of Management of Operational Work, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: pr-mech@mail.ru

### Для цитирования

### For citation

Погодин В. К. Расчет усилия герметизации запорных клапанов / В. К. Погодин, Ю. И. Белоголов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 8–15. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).8–15

Pogodin V. K., Belogolov Yu. I. Raschet usilii germetizatsii zapornykh klapanov [Calculation of sealing pressures of shut-off valves]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019. Vol. 62, No. 2, pp.8–15. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).8–15

УДК 681.5

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).15–23

**С. Б. Антошкин, М. В. Баканов, В. Н. Сизых**

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация  
Дата поступления: 18 марта 2019 г.

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОГО РОБОТА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ

**Аннотация.** В статье рассматривается алгоритм ориентации транспортных роботов по акустическому сигналу стационарного маяка или маяка, ведущего транспортное средство. Выделены особенности фильтрации сигнала для известных способов пеленгации. Проанализирован пеленг сигнала при наличии шумов. Разработан и смоделирован алгоритм для одновременного устранения неоднозначности и минимизации погрешностей измерения пеленга. Проанализированы результаты моделирования. Данный алгоритм может быть реализован на относительно несложном и недорогом микропроцессоре. При применении системы как минимум трех маяков возможна модернизация алгоритма для определения координат ведущего робота в рабочем пространстве. Для решения задачи управления ведомым роботом разработана его нелинейная математическая модель, которая реализована в среде программирования MATLAB / Simulink. На основе принципа динамической компенсации обосновывается методика построения пропорциональных с двойным дифференцированием регуляторов ведомого автономного робота. Законы управления колесной парой синтезированы на основе эталонных моделей по простой градиентной схеме метода обратных задач динамики в формулировке П. Д. Крутько для задачи стабилизации (гашения) угловых скоростей движения трехколесного мобильного робота. Разработана имитационная модель управления, включающая блок углового положения и траекторного движения робота, многомерную многоосвязную математическую модель углового движения робота, блок регулятора на основе эталонных моделей. Разработана «Simulink-модель» движения ведомого робота за ведущим, выполнен анализ результатов моделирования.

**Ключевые слова:** пеленгация, акустический сигнал, автономный робот, обратная задача динамики, регулятор с двойным дифференцированием, эталонная модель, адаптивная система управления роботом.

S. B. Antoshkin, M. V. Bakanov, V. N. Sizykh

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

Received: March 18, 2019

## AN AUTONOMOUS ROBOT CONTROL SYSTEM BASED ON AN INVERSE PROBLEMS METHOD IN DYNAMICS

**Abstract.** The article discusses the algorithm of orientation of transport robots according to the acoustic signal of a stationary beacon or beacon of a leading vehicle. Signal filtering features for known bearing methods are identified. Signal bearing is analyzed in the presence of noise. An algorithm is given to simultaneously eliminate ambiguity and minimize errors of the acoustic signal bearing. An algorithm was developed and modeled to simultaneously eliminate ambiguity and minimize bearing measurement errors. Simulation results are analyzed. This algorithm can be implemented with a relatively simple and inexpensive microprocessor. When using a system of at least three beacons, it is possible to upgrade the algorithm to determine the coordinates of the lead robot in the working space. To solve the problem of controlling the slave robot, its non-linear mathematical model has been developed, which is implemented in the MATLAB / Simulink programming environment. The method of building proportional regulators with double differentiation (PDD) for a slave autonomous robot is justified on the basis of the dynamic compensation principle. The laws of wheelset control are synthesized on the basis of reference models according to a simple gradient scheme of the method of inverse problems of dynamics in the formulation of P. D. Krut'ko for the problem of stabilizing (damping) the angular velocities of a three-wheeled mobile robot. A simulation control model has been developed, including a block of angular position and trajectory movement of the robot, a multidimensional multiply connected mathematical model of angular motion of the robot, a PDD regulator unit based on reference models. A Simulink model of the slave robot moving behind the master robot has been developed. The analysis of the simulation results has been performed.

**Keywords:** bearing, acoustic signal, autonomous robot, inverse dynamics problem, double differentiation controller, reference model, adaptive robot control system.

### Алгоритм пеленгации акустического маяка для транспортных роботов

В настоящее время получают распространение ведомые роботизированные транспортные средства доставки груза, следующие за ведущим устройством или определяющие место нахождения по опорным маячкам [1]. Для определения направления на ведущее устройство обычно устанавливается оптическая система, однако в случае малопрозрачной среды (туман, дым в воздухе или замутнение в водной среде) ориентация на оптический маячок ведущего будет осложняться или даже станет невозможной. Для определения направления в таких случаях применяются акустические сигналы [2, 3].

Известны амплитудный, фазовый и корреляционный способы пеленгации источника электромагнитного или акустического сигнала [4]. Амплитудный способ акустической пеленгации требует сенсора со сканирующей диаграммой направленности на ведомом роботе и обладает низкой помехоустойчивостью к акустическим шумам.[5] Фазовый способ требует применения гармонического сигнала или пакетов с гармоническим заполнением, но позволяет с минимальными аппаратными затратами отфильтровывать полезный сигнал и определять направление. Корреляционный способ обладает высокой помехоустой-

чивостью, но требует более сложной обработки сигнала. Как в фазовом, так и корреляционном способе для определения направления на источник сигнала требуется минимум три сенсора с целью устранения неоднозначности пеленга (рис. 1).

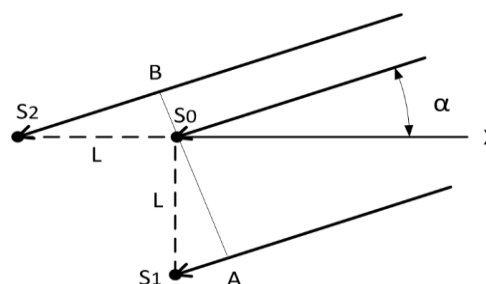


Рис. 1. Схема расположения сенсоров акустического пеленгатора

Сенсоры  $S_0 - S_2$  образуют две взаимно перпендикулярные базы пеленгатора  $S_0 - S_1$  и  $S_0 - S_2$  с одинаковой измерительной базой  $L$ , что делает расчеты более простыми. Акустический сигнал приходит под углом  $\alpha$  относительно оси пеленгатора  $S_0 - X$ . Линия  $AB$ , проходящая через сенсор  $S_0$ , совпадающая с центром координат пеленгатора, в определенный момент времени  $t_0$  сходится с фронтом акустического сигнала. Относительные задержки прихода фронта сигнала до сенсоров  $S_1$  и  $S_2$  определяются следующими выражениями:



$$\Delta t_1 = t_1 - t_0 = \frac{L}{C} \sin \alpha, \quad (1)$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_0 = \frac{L}{C} \cos \alpha,$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – моменты прихода фронта к соответствующим сенсорам,  $C$  – скорость звука в среде ( $\approx 330$  м/с для воздуха и 1 440 м/с для воды).

Таким образом, азимут источника сигнала определяется по относительным задержкам

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{C}{L} \Delta t_1\right) \quad (2)$$

или

$$\alpha = \arccos\left(\frac{C}{L} \Delta t_2\right) \quad (3)$$

Для устранения неоднозначности результатов расчета в пределах  $-\pi \dots \pi$  следует использовать знаки величин  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$ , которые зависят от угла прихода сигнала  $\alpha$ , (табл. 1). При этом достаточно вычислять только одно из выражений (2) или (3).

Так как при измерении задержек неизбежны погрешности, то следует учитывать, что при вычислении обратных тригонометрических функций результат будет иметь максимальную погрешность при абсолютных значениях аргумента, близких к единице (0,8–1). Предлагается выбирать (2) или (3) из сравнения абсолютных величин  $|\Delta t_1|$  и  $|\Delta t_2|$ .

Т а б л и ц а 1

Пределы угла прихода сигнала  $\alpha$

Пределы $\alpha$	Знак	
	$\Delta t_1$	$\Delta t_2$
$0.. \pi/2$	+	+
$\pi/2.. \pi$	+	-
$-\pi.. - \pi/2$	-	-
$-\pi/2.. 0$	-	+

Для одновременного устранения неоднозначности и минимизации погрешностей измерения пеленга разработан алгоритм (рис. 2). Величина  $K_b$  в алгоритме – нормализующий множитель, зависящий от скорости звука, измерительной базы и разрядности оцифровки  $\Delta t$ , рассчитывается так, чтобы аргумент функций (2) и (3) не выходил за пределы  $\pm 1$  с учетом погрешностей измерений.

По сравнительной оценке, абсолютной величины временных задержек  $t_1$  и  $t_2$  выбирается требуемая обратная тригонометрическая функция и задается бит 2 флага (Flag), применяемого для определения октанта (1/8 полного круга) прихода сигнала. Знаки задержек, если требуется, устанавливают биты 0 и 1 флага (соответственно для правой – левой и верхней – нижней полуплоскостей). В зависимости от значения битов флага рассчиты-

вается окончательный результат. При относительно небольшой разрядности измерения задержек достаточно табличного определения значений обратных тригонометрических функций, что сокращает количество вычислительных операций.

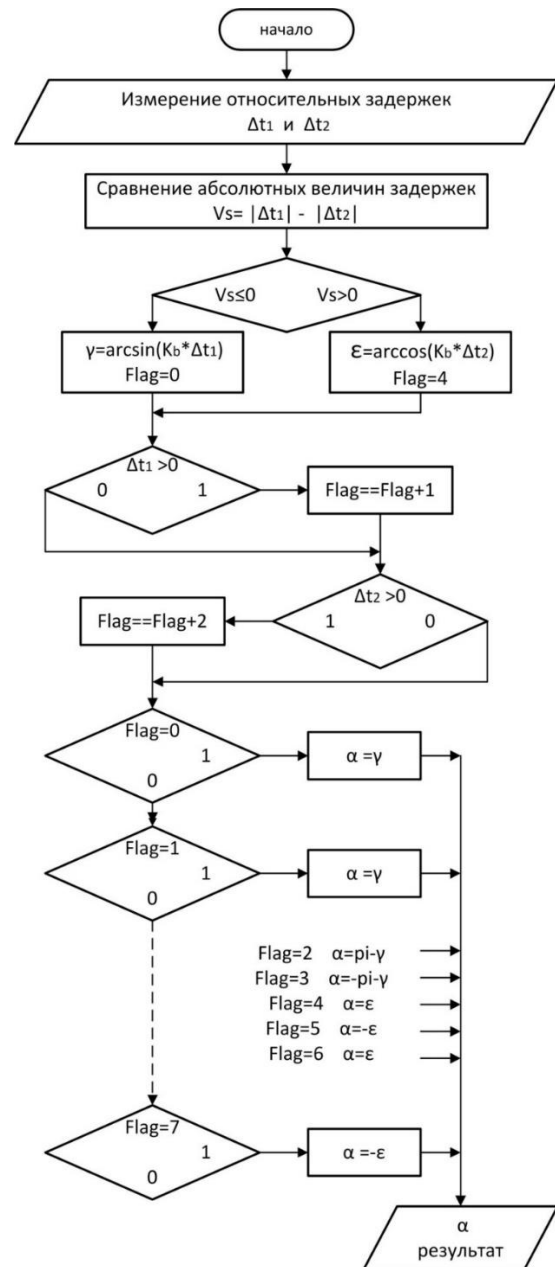


Рис. 2. Алгоритм расчета пеленга акустического сигнала

### Динамическая модель ведомого мобильного робота

Рассмотрим трехколесный мобильный робот с двумя независимыми ведущими колесами. Считаем, что колеса движутся без проскальзывания, поэтому вращающий момент  $\tau_i$  может быть определен через силу  $F_i = \tau_i / \rho$  относительно радиуса  $\rho$  двух ведущих колес [5].



С учетом этого допущения робот описывается как твердое тело, осуществляющее плоскопараллельное движение под воздействием системы сил.

Нелинейная математическая модель робота имеет вид [6]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V \cos \phi, \\ \dot{y} &= V \sin \phi, \\ \dot{\phi} &= \omega, \\ \dot{V} &= \frac{1}{\rho m} (\tau_R + \tau_L), \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{2\rho J_C} (\tau_R - \tau_L), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $x, y, \phi$  – обобщенные линейные и угловые координаты положения платформы;  $V, \omega$  – линейная и угловая скорости перемещения платформы;  $m$  – масса;  $\rho$  – радиус двух ведущих колес;  $J_C$  – момент инерции платформы относительно центра масс;  $\tau_R, \tau_L$  – электромагнитные моменты, развиваемые электродвигателями (ЭД).

Уравнения движения робота (4) дополняются уравнениями динамики следящих приводов:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V \cos \phi, \\ \dot{y} &= V \sin \phi, \\ \dot{\phi} &= \omega, \\ \dot{V} &= \frac{1}{\rho m} (\tau_R + \tau_L), \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{2\rho J_C} (\tau_R - \tau_L), \\ \dot{\tau}_L &= -\frac{R}{L} \tau_L - \frac{K_M K_W i_p}{\rho L} \left( V - \frac{\omega l}{2} \right) + \frac{K_M}{L} U_L, \\ \dot{\tau}_R &= -\frac{R}{L} \tau_R - \frac{K_M K_W i_p}{\rho L} \left( V + \frac{\omega l}{2} \right) + \frac{K_M}{L} U_R, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $R, L$  – активное сопротивление и индуктивность в цепи якоря;  $U, I$  – напряжение питания и ток в обмотке якоря;  $i_p$  – передаточные числа редукторов;  $K_M, K_W$  – конструктивные постоянные ЭД по электромагнитному моменту и угловой скорости;  $l$  – расстояние между колесами.

Модель динамики (5) представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений седьмого порядка с фазовым вектором  $(x, y, V, \phi, \omega, \tau_L, \tau_R)$  и вектором управления  $(U_L, U_R)$ , и непосредственно используется при синтезе законов управления мобильным роботом. Однако при этом необходимы другие формы представления его математической модели [7–9].

#### Алгоритмы управления мобильным роботом по методу обратных задач динамики

Так как в системе уравнений (5) первые три уравнения представляют собой уравнения связи,

то для исследования динамики движения робота достаточно использовать последние четыре уравнения.

Через дифференцирование шестого и седьмого уравнений в системе (5) и после подстановки в них четвертого и пятого уравнений получим

$$\begin{aligned} \ddot{\tau}_L + a_{11} \dot{\tau}_L + \left( a_{12} \frac{1}{\rho m} - \frac{l^2}{4\rho J_C} \right) \tau_R + \\ + \left( a_{12} \frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_C} \right) \tau_L = b_{11} \dot{U}_L \\ \ddot{\tau}_R + a_{11} \dot{\tau}_R + \left( a_{12} \frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_C} \right) \tau_R + \\ + \left( a_{12} \frac{1}{\rho m} - \frac{l^2}{4\rho J_C} \right) \tau_L = b_{11} \dot{U}_R. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь обозначены

$$a_{11} = \frac{R}{L}, \quad a_{12} = \frac{K_M K_W i_p}{\rho L}, \quad b_{11} = \frac{K_M}{L},$$

$\dot{U}_L, \dot{U}_R$  – управляющие воздействия (скорости изменения напряжения питания).

Далее представлены конструктивные параметры мобильного робота (табл. 2).

При синтезе законов управления по методу обратных задач динамики [12–14] математическая модель

робота (6) принимается за объект управления.

В матричном виде система уравнений (6) принимает вид

$$\dot{X} + C\dot{X} + DX = Bu, \quad (7)$$

где  $X = (\tau_L, \tau_R)$  – вектор состояния (электромагнитных моментов);  $u = (\dot{U}_L, \dot{U}_R)$  – вектор управляющих воздействий;

$$C = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 \\ 0 & a_{11} \end{bmatrix} = \text{diag}\{a_{11}, a_{11}\},$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{11} \end{bmatrix} = \text{diag}\{b_{11}, b_{11}\}$$

– диагональные матрицы;

$$D = \begin{bmatrix} a_{12} \frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_C} & a_{12} \frac{1}{\rho m} - \frac{l^2}{4\rho J_C} \\ a_{12} \frac{1}{\rho m} - \frac{l^2}{4\rho J_C} & a_{12} \frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_C} \end{bmatrix}$$

– симметрическая матрица ( $D^{-1} = D^T$ ).

В скалярной форме система уравнений (7) принимает вид

$$\begin{aligned} \ddot{\tau}_L + a_{11} \dot{\tau}_L + d_{11} \tau_L + d_{12} \tau_R = b_{11} \dot{U}_L \\ \ddot{\tau}_R + a_{11} \dot{\tau}_R + d_{11} \tau_R + d_{12} \tau_L = b_{11} \dot{U}_R \end{aligned} \quad (8)$$

Анализ уравнений (7) и (8) показывает, что мобильный робот как объект управления является многосвязной ( $m = 2$ ) и многомерной ( $n = 2$ ) системой.



Задача синтеза управлений для стабилизации [10] (гашения) угловых скоростей робота на интервале времени  $[t_0, t_k]$  ( $t_k$  – нефиксированная величина) формулируется следующим образом: пусть в текущий момент времени  $t = t_0 = 0$  состояние управляемой по моментам  $\tau_1 = \tau_L, \tau_2 = \tau_R$  системы (6) определяется значениями  $\tau_i(0) = \tau_{i0}, i = 1, 2$ .

Необходимо определить управляющие воздействия  $\dot{U}_i (\dot{U}_1 = \dot{U}_L, \dot{U}_2 = \dot{U}_R)$ , при которых система (6) переходит из состояния  $\tau_{i0}$  в новое состояние  $\tau_{i\text{зад}}$ , где  $\tau_{i\text{зад}} = \tau_{i\text{зад}}(t)$  – заданные моменты вращения [11]. Необходимо чтобы вращающиеся моменты управляемого движения по каждой степени свободы с требуемой точностью следовали за моментами, определяемыми эталонной моделью

$$\ddot{X}_{\text{эти}} + C_i \dot{X}_{\text{эти}} + D_i X_{\text{эти}} = D_i \tau_{i\text{зад}}, i = 1, 2, \quad (9)$$

с вычисленными ранее коэффициентами  $C_i$  и  $D_i$ .

Заданное изменение напряжения питания на зажимах обмотки якоря правого и левого ЭД определяет заданное эталонное движение

$$B_i \dot{U}_{i\text{зад}} = D_i \tau_{i\text{зад}}, i = 1, 2, 3. \quad (10)$$

С помощью ШИМ-регулятора осуществляется изменение напряжения питания.

Эталонное движение устойчиво при  $X_{\text{эти}} \rightarrow \tau_{i\text{зад}}$ , при  $t \rightarrow \infty$ .

Представим эталонную модель (9) в скалярном виде

$$\ddot{\tau}_{\text{эTL}} + a_{11} \dot{\tau}_{\text{эTL}} + d_{11} \tau_{\text{эTL}} = d_{11} \tau_{L\text{зад}}, \quad (11)$$

$$\ddot{\tau}_{\text{эTR}} + a_{11} \dot{\tau}_{\text{эTR}} + d_{11} \tau_{\text{эTR}} = d_{11} \tau_{R\text{зад}}.$$

Из формулы (10) изменение напряжения питания на зажимах обмотки якоря правого и левого колеса в скалярной форме переписывается как

$$\dot{U}_{L\text{зад}} = \frac{d_{11}}{b_{11}} \tau_{L\text{зад}}, \quad \dot{U}_{R\text{зад}} = \frac{d_{11}}{b_{11}} \tau_{R\text{зад}}. \quad (12)$$

Через минимизацию функционала

$$G(\dot{U}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 [\ddot{X}_{\text{эти}} - \ddot{X}_i(t, \dot{U}_L)]^2 \quad (13)$$

оценивается степень приближения управляемого процесса к эталонной модели  $x_{\text{эти}}(t) \rightarrow \tau_{i\text{зад}}$ .

Функционал характеризует изменение момента вращения колес мобильного робота в окрестности изменения эталонного момента вращения [15].

По схеме градиентного метода определяют законы управления  $\dot{U}_i(x)$  по каждой степени свободы вращения колес

$$\frac{\partial \dot{U}_i(x)}{\partial t} = \ddot{U}_i(x) = - \sum_{j=1}^2 r_{ij} \frac{\partial G(\dot{U})}{\partial \dot{U}_j}, r_{ij} = \text{const} \quad (14)$$

Из формул (9), (13) определяются компоненты градиента в (14)

$$\frac{\partial G(\dot{U})}{\partial U_j} = -b_{11} (\ddot{X}_{\text{эTj}} - \ddot{X}_j), j = 1, 2. \quad (15)$$

Отсюда следует, что

$$\ddot{U}_i(x) = \sum_{j=1}^2 r_{ij} b_{11} (\ddot{X}_{\text{эTj}} - \ddot{X}_j) \quad (16)$$

Требуемый закон управления (регулирования напряжения в цепи обмотки якоря ЭД) определяется через интегрирование по времени обеих частей выражения (16)

$$U_i(x) = \sum_{j=1}^2 r_{ij} b_{11} (X_{\text{эTj}} - X_j) \quad (17)$$

Здесь требуемые значения моментов  $x_{\text{эTj}}$  вычисляются по формуле (9).

Законы управления (17) колесной парой робота в скалярной форме имеют вид

$$U_L = r_{11} b_{11} (\tau_{\text{эTL}} - \tau_L) + r_{12} b_{11} (\tau_{\text{эTR}} - \tau_R),$$

$$U_R = r_{21} b_{11} (\tau_{\text{эTL}} - \tau_L) + r_{22} b_{11} (\tau_{\text{эTR}} - \tau_R), \quad (18)$$

а в матричном виде определяют известную процедуру аналитического конструирования регуляторов в форме

$$U = -RB\Delta\tau, \quad (19)$$

где  $\Delta\tau = \begin{bmatrix} \tau_L - \tau_{\text{эTL}} \\ \tau_R - \tau_{\text{эTR}} \end{bmatrix}$  – вектор изменения моментов,

развиваемых ЭД;  $B = \text{diag}(b_{11}, b_{11})$ , структура матрицы  $R = \|r_{ij}\|$  определяется характером перекрестных связей по переменной  $x_j$  в формулах

$$(16) \text{ или } (17) R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix}, \text{ причем } r_{12} = r_{21}.$$

Принимается  $R = R^T > 0$ . Тогда  $G(\dot{U}) < 0$  и замкнутая регулятором (17) система (5) асимптотически устойчива по Ляпунову:  $\ddot{X}_{\text{эTj}} \rightarrow \ddot{X}_j$  при  $t \rightarrow \infty$ .

Т а б л и ц а 2

Конструктивные параметры мобильного робота

Параметр	$J_C$	$\rho$	$m$	$l$	$K_W$	$R$	$L$	$i_p$
Единица измерения	кг · см <sup>2</sup>	м	кг	м	–	Ом	Гн	–
Числовое значение	$25 \cdot 10^{-5}$	0,0325	1	0,135	0,0080	0,36	$1,23 \cdot 10^{-3}$	55,74



**«Simulink-модель» мобильного робота, синтезированная по методу обратных задач динамики**

На основе уравнений (8), (11), (12), (18) составляется математическая модель системы управления автономного робота, синтезированной

по методу обратных задач динамики [16–18]. Имеется общая структура «Simulink-модели» робота (рис. 3). Модель состоит из следующих основных блоков:

1. Блок, реализующий угловое положение и траекторное движение робота (рис. 3).

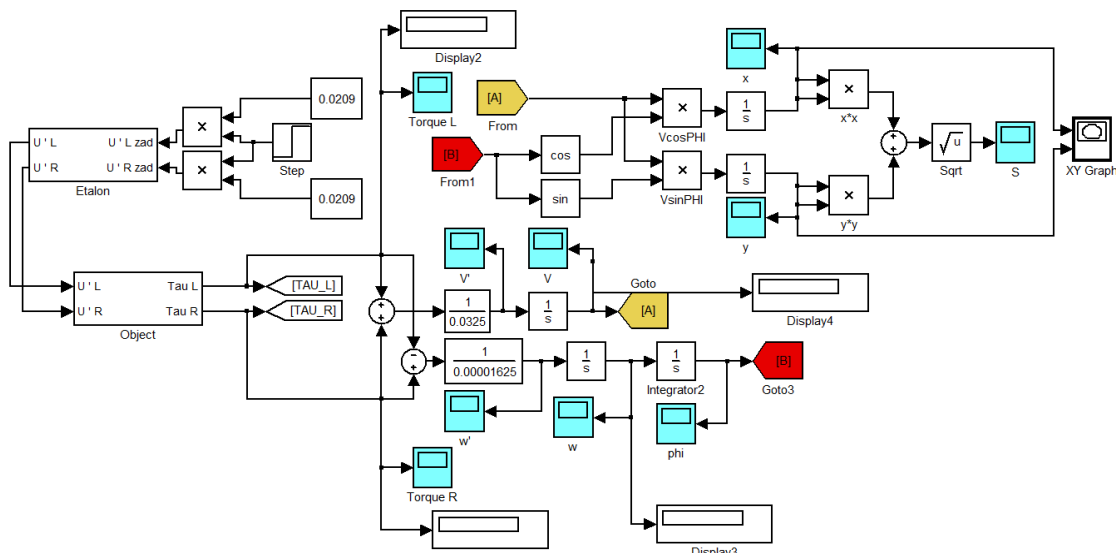


Рис. 3. Общая структура «Simulink-модели» мобильного робота

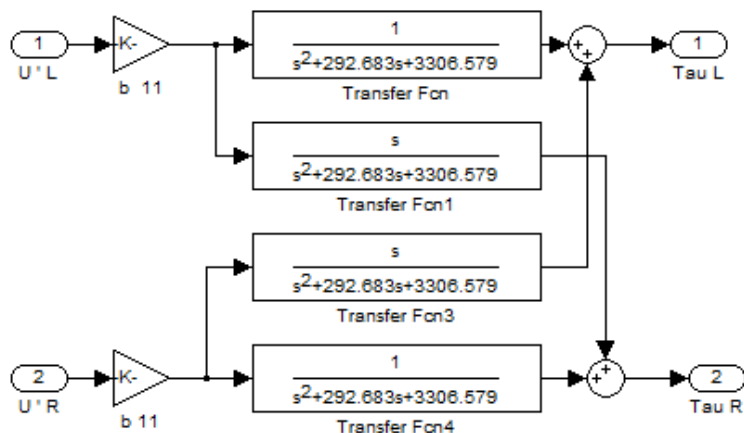


Рис. 4. Многомерная математическая модель углового движения робота

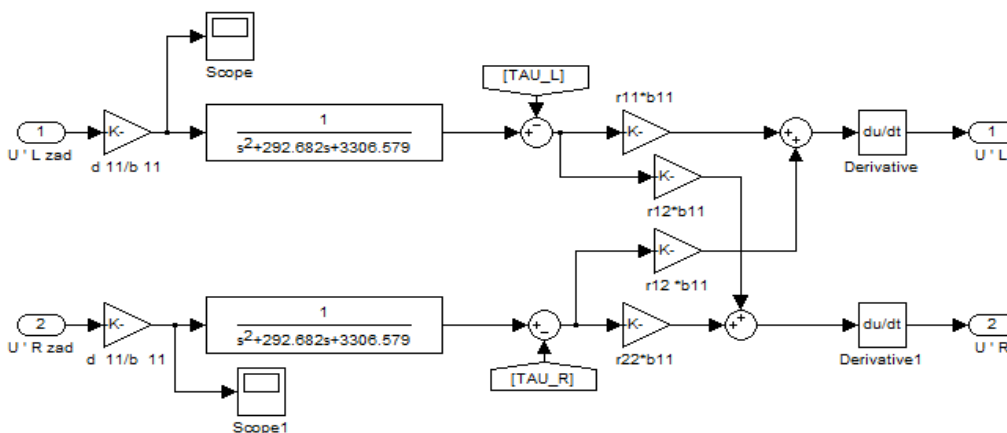


Рис. 5. ПИД-регулятор на основе эталонной модели

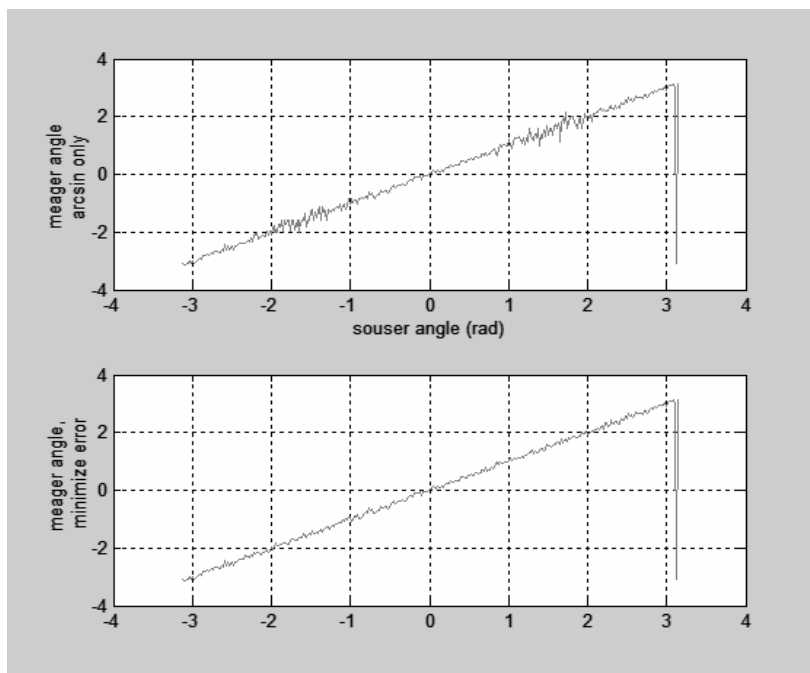


Рис. 6. Сравнительное моделирование измерения пеленга сигнала при наличии шумов

2. Блок многомерной математической модели углового движения робота (рис. 4).

3. Блок, реализующий регулятор с двойным дифференцированием (ПДД-регулятор) [19, 20], на основе эталонных моделей колесной пары (рис. 5).

#### Результаты моделирования

Приведены результаты сравнительного анализа определения пеленга сигнала с уровнем шума приблизительно в 5 % (рис. 6). На верхнем графике пеленг определяется только по выражению (2), а на нижнем графике с учетом сравнения абсолютных величин  $|\Delta t_1|$  и  $|\Delta t_2|$ . Наглядно видно значительное увеличение погрешностей верхнего графика, рассчитанного только по функции  $\arcsin$  при значениях углов, близких к  $\pm \pi/2$ .

Анализ результатов показывает, что при синтезе системы управления на основе ПДД-регуляторов обеспечивается высокая синхронность отклонения колес колесной пары. Согласно пятой формуле системы (4), угловая скорость в

режиме стабилизации движения робота ( $\omega_{\text{зад}} = 0$ ) также стремится к нулю, и ведомый робот по прямой линии движется за ведущим.

#### Заключение

Для ведомого транспортного робота разработан алгоритм определения направления на акустический маяк с минимизацией погрешностей пеленгации и устранения неоднозначности определения пеленга. При применении системы как минимум трех маяков возможна модернизация алгоритма для определения координат робота на рабочем пространстве.

На основе принципа динамической компенсации обосновывается методика построения ПДД-регуляторов ведомого автономного робота, синтезированных на основе эталонных моделей по методу обратных задач динамики. Разработана «Simulink-модель» движения ведомого робота за ведущим.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Подураев Ю.В. Основы мехатроники: Учебное пособие. М. : Станкин, 2000. 80с.
2. Воротников С.А. Информационные устройства робототехнических систем. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 384 с.
3. Автономные подводные роботы: системы и технологии / М.Д. Агеев, Л.В. Киселев, Ю.В. Матвиенко и др.; Ин-т проблем морских технологий. М. : Наука. 2005. 398 с.
4. Радиотехнические системы / Ю.П. Гришин, В.П. Ипатов, Ю.М. Казаринов и др. М. : Высш. шк., 1990. 496 с.
5. Сизых В.Н., М.В. Баканов Математическая модель для адаптивного управления трёхколёсным мобильным роботом // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство : материалы междунар. науч.-практ. конф. СПб. : СПбФ НИЦ МС, 2018. № 1. С. 9–18.
6. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т.3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егулова. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 616 с.
7. Ang A.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, desing and technology / IEEE Trans. on Control Syst. Tech., 2005. Vol. 13. № 4. P. 559–576.
8. Astom K.J., Hagglunk T. Advanced PID control // Instrumentation, Systems and Automation Society, 2006. 406 p.



9. Quevedo J., Escobet T. Digital control: past, present and future of PID control // Proc. IFACWorkshop. Terassa, Spain, Apr. 5-7, 2000.
10. Булгаков В.В., В.С. Кулабухов Сравнительный анализ формализованных методов синтеза регулятора следящей системы // Приборы. 2013. № 1 (151). С. 39–44.
11. Ким Д.П. Алгебраический метод синтеза линейных непрерывных систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 1. С. 9–15.
12. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum setting for automatic controllers. // Trans. ASME. 1942. Vol. 64. P. 759–768.
13. Farhan A.S. New efficient model-based PID design method // European Scientific Journal Edition. 2013. Vol. 9, № 15. P. 181–190.
14. Сизых В.Н., Мухопад А.Ю. Ассоциативный автомат адаптивного управления технологическими процессами на основе нейронных сетей // Науч. вестн. Новосиб. гос. техн. ун-та. 2014. № 1 (54). С. 34–45.
15. Ageev A.M., Сизых В.Н. Синтез оптимальных регуляторов системы управления самолетом через решение обратной задачи АКОР // Науч. вестн. Новосиб. гос. техн. ун-та. 2014. № 3 (56). С. 7–22.
16. Leva A., Cox C., Ruano A. Hands-on PID autotuning: a guide to better utilization – IFAC Professional Brief // International Federation of Automatic Control. URL: <http://www.ifac-control.org>.
17. Изерман Р. Цифровые системы управления. М. Мир, 1984. 541 с.
18. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / под ред. Н.Д. Егупова М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. 744 с.
19. Ротач В.Я. Теория автоматического управления // М. : МЭИ, 2004. 400 с.
20. Сизых В.Н., Баканов М.В. Алгоритмическое обеспечение адаптивной системы управления автономным мобильным роботом // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте : сб. науч. тр. Вып. 27. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2017. С. 33–47.

## REFERENCES

1. Poduraev Yu.V. Osnovy mekhatroniki: Uchebnoe posobie [Fundamentals of Mechatronics: a study guide]. Moscow: Stankin Publ., 2000. 80 p.
2. Vorotnikov S.A. Informatsionnye ustroystva robototekhnicheskikh sistem [Information devices of robotic systems]. Moscow: Bauman MGTU Publ., 2005. 384 p.
3. Ageev M.D., Kiselev L.V., Matvienko Yu.V. et al.; Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy i tekhnologii [Autonomous underwater robots: systems and technologies]. In-t problem morskikh tekhnologii [Institute of problems of marine technologies]. Moscow: Nauka Publ., 2005. 398 p.
4. Grishin Yu.P., Ipatov V.P., Yu.M. Kazarinov et al. Radiotekhnicheskie sistemy [Radio engineering systems]. Moscow: Vyssh. shk. Publ., 1990. 496 p.
5. Sizykh V.N., M.V. Bakanov Matematicheskaya model' dlya adaptivnogo upravleniya trekhkolesnym mobil'nym robotom [A mathematical model for adaptive control of a three-wheeled mobile robot]. *Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo : materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf [Transport, mining and construction engineering: science and production: materials of the Intern. scientific and practical conf.]*. St.Petersburg : SPbF NITs MS Publ., 2018. No. 1. Pp. 9–18.
6. Pupkov K.A., Egupov N.D. (ed.). Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya. T.3: Sintez regulyatorov sistem avtomaticheskogo upravleniya [Methods of classical and modern theory of automatic control. Vol.3: Synthesis of regulators of automatic control systems]. Moscow: Bauman MGTU Publ., 2004. 616 p.
7. Ang A.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design and technology. *IEEE Trans. on Control Syst. Tech.*, 2005. Vol. 13. No. 4. Pp. 559–576.
8. Astom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. *Instrumentation, Systems and Automation Society*, 2006. 406 p.
9. Quevedo J., Escobet T. Digital control: past, present and future of PID control. *Proc. IFACWorkshop*. Terassa, Spain, Apr. 5-7, 2000.
10. Bulgakov V.V., V.S. Kulabukhov Sravnitel'nyi analiz formalizovannykh metodov sinteza regulyatora sledyashchei sistemy [The comparative analysis of formalized methods of the synthesis of the tracking system regulator]. *Pribory [Instrumentation]*, 2013. No. 1 (151). Pp. 39–44.
11. Kim D.P. Algebraicheskii metod sinteza lineinykh nepreryvnykh sistem upravleniya [Algebraic method of synthesis of linear continuous control systems]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie [Mechatronic, automation, control]*, 2011. No. 1. Pp. 9–15.
12. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum setting for automatic controllers. *Trans. ASME*. 1942. Vol. 64. R. 759–768.
13. Farhan A.S. New efficient model-based PID design method. *European Scientific Journal Edition*. 2013. Vol. 9, No. 15. Pp. 181–190.
14. Sizykh V.N., Mukhopad A.Yu. Assotsiativnyi avtomat adaptivnogo upravleniya tekhnologicheskimi protsessami na osnove neironnykh setei [Associative automatic of adaptive control of technological processes based on neural networks.] *Nauch. vestn. Novosib. gos. tekhn. un-ta [Scientific Bulletin of NSTU]*, 2014. No. 1 (54). Pp. 34–45.
15. Ageev A.M., Sizykh V.N. Sintez optimal'nykh regulyatorov sistemy upravleniya samoletom cherez reshenie obratnoi zadachi AKOR [Optimal regulators' synthesis for the flight automatic control based on analytic construction problem in the singular formulation]. *Nauch. vestn. Novosib. gos. tekhn. un-ta [Scientific Bulletin of NSTU]*, 2014. No. 3 (56). Pp. 7–22.
16. Leva A., Cox C., Ruano A. Hands-on PID autotuning: a guide to better utilization – IFAC Professional Brief. *International Federation of Automatic Control*. URL: <http://www.ifac-control.org>.
17. Izerman R. Tsifrovye sistemy upravleniya [Digital control systems]. Moscow: Mir Publ., 1984. 541 p.
18. Egupov N.D. (ed.). Metody robastnogo, neuro-nechetkogo i adaptivnogo upravleniya [Methods of robust, neuro-fuzzy and adaptive control]. Moscow: Bauman MGTU Publ., 2002. 744 p.
19. Rotach V.Ya. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya [The theory of automatic control]. Moscow: MEI Publ., 2004. 400 p.
20. Sizykh V.N., Bakanov M.V. Algoritmicheskoe obespechenie adaptivnoi sistemy upravleniya avtonomnym mobil'nym robotom [Algorithmic support of an adaptive control system for an autonomous mobile robot]. *Informatsionnye sistemy kontrolya i upravleniya v promyshlennosti i na transporte : sb. nauch. tr [Information systems for monitoring and control in industry and transport: coll. of research papers]*. Issue 27. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2017. Pp. 33–47.



**Информация об авторах****Authors**

*Антошкин Станислав Борисович* – к. т. н., доцент кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: antoshkinsb@gmail.com

*Баканов Максим Витальевич* – магистрант, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: maximbakanov@mail.ru

*Сизых Виктор Николаевич* – д. т. н., доцент, профессор кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: sizykh\_vn@mail.ru

*Stanislav Borisovich Antoshkin* – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor at the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk e-mail: antoshkinsb@gmail.com

*Maksim Vital'evich Bakanov* – Master's student, Irkutsk State Transport University Irkutsk, e-mail: maximbakanov@mail.ru

*Viktor Nikolaevich Sizykh* – Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor at the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: sizykh\_vn@mail.ru

**Для цитирования****For citation**

Антошкин С. Б. Система управления автономного робота на основе метода обратных задач динамики / С. Б. Антошкин, М. В. Баканов, В. Н. Сизых // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 15–23. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).15–23

Antoshkin S. B., Bakanov M. V., Sizykh V. N. Sistema upravleniya avtonomnogo robota na osnove metoda obratnykh zadach dinamiki [An autonomous robot control system based on an inverse problems method in dynamics]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019. Vol. 62, No. 2, pp. 15–23. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).15–23

УДК 62.752, 621.534.833; 888.6

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).23–33

**А. В. Елисеев, С. В. Елисеев***Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация**Дата поступления: 22 марта 2019 г.***ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИАДЫ В ПОДХОДАХ С ПОЗИЦИЙ МЕЗОМЕХАНИКИ**

**Аннотация.** В статье рассматриваются основные теоретические положения научной концепции, позволяющей проводить оценку динамических свойств механических колебательных систем, в состав которых включены особые структурные образования. Такого рода образования из типовых элементов называются диадами и используются в математическом моделировании объектов, расчетные схемы отображаются структурами, в том числе и колебательными, что предполагает возможность выявления новых динамических свойств и эффектов. Развиваются методологические позиции, создающие потенциал для описания и формирования динамических свойств диад как структурообразующих фундаментальных элементов механических колебательных систем. Цель работы заключается в развитии метода разработки математических моделей для оценки динамических состояний, формируемых начальными условиями задания движения при обеспечении существования характерных точек распределения амплитуд колебаний в виде «узлов колебаний» в режиме безударных колебаний массоинерционных элементов системы. Используются методы структурного математического моделирования, показаны возможности создания режимов, исключающих при определенных начальных условиях возбуждения свободных колебаний эффекты соприкосновения элементов. Получены аналитические соотношения, определяющие вероятность реализации предлагаемых режимов. Приводятся результаты вычислительного моделирования, сформулировано заключение о других направлениях развития спектра динамических свойств. Показаны возможности реализации динамических состояний, при которых массоинерционные элементы диады в своих движениях обеспечивают проявления характерных условно неподвижных точек. Рассмотрены допустимые изменения динамических свойств диады путем введения дополнительных связей, реализуемых массоинерционными элементами различных типов, в том числе и устройствами преобразования движений.

**Ключевые слова:** диада, структурные образования, характерные точки, преобразование движения, приведенные массы, центр масс.

**A. V. Eliseev, S. V. Eliseev***Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation**Received: March 22, 2019***PECULIARITIES OF DYNAMIC PROPERTIES OF A DYAD IN APPROACHES FROM THE PERSPECTIVES OF MEZOMECHANICS**