

На правах рукописи

Бартенев Виталий Владимирович

**ДИНАМИКА УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С  
ДВУМЯ НЕЗАВИСИМЫМИ ВЕДУЩИМИ КОЛЕСАМИ**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Курск – 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» на кафедре теоретической механики и мехатроники

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ  
Яцун Сергей Федорович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Голован Андрей Андреевич

кандидат технических наук  
Широков Сергей Викторович

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук  
«Институт проблем механики  
им. А.Ю. Ишлинского РАН»

Защита состоится 22 декабря 2010 г. в 13.00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.105.01 при Юго-Западном государственном университете по адресу: г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета.

Автореферат разослан «19» ноября 2010 г.

Ученый секретарь совета  
по защите докторских и  
кандидатских диссертаций Д 212.105.01

Б.В. Лушников

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** В настоящее время области применения мобильной робототехники существенно расширяются во многих отраслях деятельности человека. Особенно это характерно для деятельности, осуществляемой при решении специальных задач, сопряженных с угрозами для здоровья и жизни людей. К таким задачам относятся антитеррористические операции, военные действия, пожаротушение и т. п.

Одним из классов мобильных роботов являются колесные роботы. Такие роботы не могут эффективно передвигаться по неподготовленным поверхностям. Однако в случае с подготовленными поверхностями применение колесных роботов в сравнении с использованием других видов мобильных роботов (например, шагающих) более оправдано в силу превосходства по экономичности, скорости передвижения и простоте управления.

Расширение областей применения колесных роботов определяет рост требований к качеству их функционирования, в частности к быстродействию, которое характеризуется временем отработки заданных участков траекторий, и к точности этой отработки. Различным аспектам проблемы отработки мобильными колесными роботами заданных траекторий движения посвящены работы как отечественных (Буданова В.М., Бурдакова С.Ф., Девянина Е.А., Зенкевича С.Л., Мартыненко Ю.Г., Мирошника И.В., Охоцимского Д.Е., Павловского В.Е., Подураева Ю.В., Стельмакова Р.Э., Формальского А.М. и др.), так и зарубежных ученых (Bastin G., Campion G., Canudas de Wit C., Dixon W., Fung Y.H., Isidori A. и др.). Однако вопрос быстродействия и точности движений колесных систем не является окончательно решенным.

В этой связи объективно сложилось противоречие между потребностями практики по применению мобильных колесных роботов и их ограниченными возможностями.

Это определило актуальность исследования динамики управляемого движения мобильных колесных систем, его значимость для теории и практики их создания.

**Объектом исследований** в работе является управляемая динамическая мехатронная система — мобильный робот с двумя независимыми ведущими колесами.

**Цель работы** состоит в повышении качества функционирования мобильных роботов с двумя независимыми ведущими колесами по комплексному критерию, учитывающему быстродействие и точность движений, на основе развития математической модели и исследования динамики этих мехатронных систем, а также разработки метода управления их движением.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Разработка математической модели мобильного робота с двумя независимыми ведущими колесами и оптронной матрицей в качестве сенсорной системы. При этом указанная модель описывает электромеханическую подсистему и подсистему управления движением с учетом: изменения в процессе движения робота вдоль криволинейных траекторий модулей сил нормальной реакции горизонтальной шероховатой плоскости, действующих на ведущие колеса; условия отсутствия поперечного проскальзывания и отрыва от горизонтальной шероховатой плоскости ведущих колес робота; дискретности системы управления движением; дискретности величины отклонений, измеряемых оптронными линейками матрицы.

2. Разработка метода управления движением робота по сигналу оптронной матрицы, реализующего расчет управляющих напряжений в зависимости от величины отклонения от заданной траектории движения.

3. Разработка алгоритма математического моделирования управляемого движения робота вдоль заданной траектории.

4. Программная реализация разработанного алгоритма математического моделирования управляемого движения робота вдоль заданной траектории.

5. Исследование динамики управляемого движения робота по горизонтальной шероховатой плоскости на базе разработанной математической модели для различных законов управления.

6. Определение характера влияния значения коэффициента трения качения на точность отработки заданной траектории для различных законов управления.

7. Определение областей параметров движения робота, обеспечивающих отсутствие поперечного проскальзывания ведущих колес и отрыва ведущего колеса от горизонтальной шероховатой плоскости.

8. Разработка методики экспериментальных исследований управляемого движения робота, позволяющей оценить степень адекватности предложенной математической модели реальному объекту.

9. Создание программно-аппаратного комплекса для целей реализации экспериментальных исследований управляемого движения робота на базе предложенной методики.

**Методы исследования.** При решении поставленных в работе задач использовались методы теоретической механики, теории автоматического управления, теории управления с использованием нечеткого логического вывода, теории искусственных нейронных сетей, математического моделирования, оптимизации с применением генетических алгоритмов.

**Достоверность научных положений и результатов.** Основные научные результаты диссертации получены на основе математического аппарата неголономной механики, теории автоматического управления, а также методов экспериментальных исследований. Результаты экспериментальных исследований согласуются с теоретическими результатами.

**Научная новизна:**

1. Разработана математическая модель мобильного робота с двумя независимыми соосными ведущими колесами, описывающая его электромеханическую подсистему и подсистему управления движением с учетом изменения в процессе движения робота вдоль криволинейных траекторий модулей сил нормальной реакции горизонтальной шероховатой плоскости, действующих на ведущие колеса.

2. Выявлены закономерности управляемого различными методами движения робота вдоль заданной  $s$ -образной траектории, анализ которых показал, что нечеткое управление по сигналу оптронной матрицы в сравнении с «детерминированным» управлением по сигналу оптронной линейки обеспечивает повышение качества движения по критерию «быстродействие×точность» на 160-170%.

3. Определены области значений параметров движения робота, предполагающих отработку криволинейных траекторий без поперечного проскальзывания и с поперечным проскальзыванием ведущих колес, а также без отрыва и с отрывом ведущего колеса от горизонтальной шероховатой плоскости.

**Практическая ценность.** Основная практическая ценность работы состоит в том, что использование ее результатов при создании систем управления движением мобильных роботов с двумя независимыми соосными ведущими колесами обеспечит более высокое в сравнении с существующими подходами качество движения по критерию «быстродействие×точность».

Разработано программное приложение («Эмулятор движения мобильного колесного робота» — свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010613625), обеспечивающее возможность разработки и отладки алгоритмов управления движением мобильного робота с двумя независимыми ведущими колесами на базе моделирования его управляемого движения в реальном масштабе времени.

Создан экспериментальный образец мобильного робота с двумя независимыми ведущими колесами («Мобильный робот с оптронной матрицей» — патент РФ на полезную модель №99253), где в качестве сенсора используется оптронная матрица.

Этот образец может быть использован для проведения экспериментальных исследований в рамках решения задач мехатроники.

Результаты проведенных в рамках настоящей работы исследований использованы при выполнении гранта РФФИ №08-08-00438-а «Динамика и управление движением автономных вибрационных мобильных микророботов по шероховатой поверхности» (2008-2010 гг.), госконтрактов №П2228 от 11.11.2009 г., №П2285 от 13.11.2009 г. в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы. Также указанные результаты применяются в учебном процессе кафедры теоретической механики и мехатроники ЮЗГУ.

**Апробация работы.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на научном семинаре в учреждении Российской академии наук «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН» (г. Москва, 2010 г.), на научном семинаре имени А.Ю. Ишлинского по прикладной механике и управлению (г. Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова, 2010 г.), Всероссийском научном семинаре для молодежи «Мехатроника, робототехника. Современное состояние и тенденции развития» (г. Курск, 2010 г.), Международной научно-технической конференции «Вибрационные машины и технологии» (г. Курск, 2008 г.), Международной научно-технической конференции «Управляемые вибрационные технологии и машины» (г. Курск, 2010 г.), Санкт-Петербургских Международных конференциях по интегрированным навигационным системам (г. Санкт-Петербург, 2009, 2010 гг.), Международной научно-практической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления» (г. Коломна, 2009 г.), Всероссийских научно-практических конференциях «Интегрированные модели, мягкие вычисления, вероятностные системы и комплексы программ в искусственном интеллекте» (г. Коломна, 2009 г.) и «Современные наукоемкие инновационные технологии» (г. Самара, 2009 г.), а также на семинарах кафедры теоретической механики и мехатроники ЮЗГУ.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе: 8 статей, из них 1 по Перечню ВАК, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 патент на полезную модель.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка из 122 наименований. Текст диссертации изложен на 140 страницах, содержит 91 рисунок, 4 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, показана новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** дана общая характеристика класса мобильных колесных роботов, анализ которой позволил сделать вывод о том, что в качестве объекта предполагаемых настоящей работой исследований весьма удобно в силу статической устойчивости выбрать трехколесного робота. Анализ типов организации движения трехколесных роботов позволил заключить, что одним из наиболее перспективных из них является тип, предполагающий применение двух независимо моторизованных соосных ведущих колес. Проведены аналитические обзоры подходов к математическому описанию движения мобильного робота с двумя независимыми ведущими колесами, его существующих математических моделей, предполагающих движение по горизонтальной шероховатой плоскости. Проанализированы результаты исследований этих моделей. Дана характеристика задачи навигации и управления движением мобильных роботов с учетом особенностей, характерных для колесных систем. Выделены составляющие указанной задачи, проведен обзор методов, применяемых для их решения.

Во второй главе дано подробное описание конструкции мобильного робота с двумя независимо моторизованными соосными ведущими колесами, сенсорной системой которого является оптронная матрица (рис. 1).

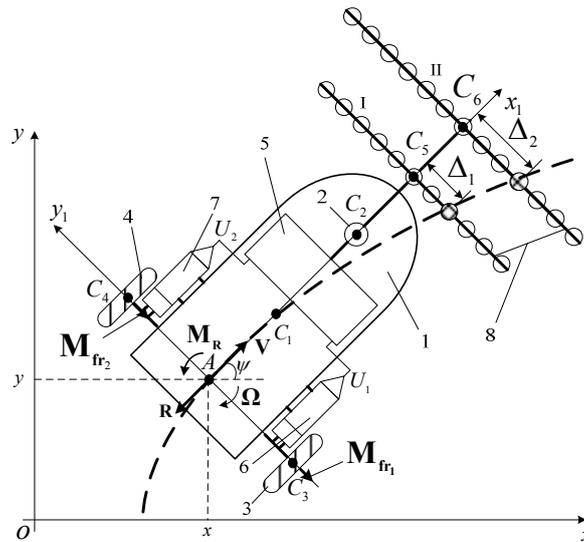


Рис. 1. Расчетная схема мобильного робота для вывода уравнений движения:  
1 — платформа; 2 — абсолютно гладкая опора; 3,4 — ведущие колеса; 5 — блок расчета управляющих напряжений; 6,7 — электроприводы; 8 — оптронная матрица

Составлены уравнения движения рассматриваемой мехатронной системы. Для этого были введены следующие системы координат (рис. 1): неподвижная система  $Oxyz$ , плоскость которой  $Oxy$  совпадает с горизонтальной шероховатой плоскостью, по которой катятся колеса робота, и подвижная система  $Ax_1y_1z_1$  с началом в точке  $A$ , жестко связанная с его платформой. При этом центр масс робота  $C_1$  лежит на оси  $Ax_1$ , являющейся осью симметрии шасси. Также были приняты следующие допущения: робот рассматривается как система абсолютно твердых тел; движение осуществляется без проскальзывания; массы опоры 2 и шестерней редукторов считаются равными нулю; в точке  $C_2$  платформа имеет абсолютно гладкую опору; робот движется опорой вперед.

С учетом принятых допущений робот рассматривается как система трех абсолютно твердых тел, одним из которых является платформа совместно с оптронной матрицей и электродвигателями с редукторами (электроприводами), двумя другими — ведущие колеса. Положение этих тел в системе координат  $Oxyz$  определяется вектором обобщенных координат  $\mathbf{q}_1 = |x \ y \ \psi \ \varphi_1 \ \varphi_2|^T$ , где  $x, y$  — координаты точки  $A$  (полюса робота) — середины отрезка, соединяющего центры  $C_3, C_4$  ведущих колес;  $\psi$  — угол поворота вокруг вертикали платформы, отсчитываемый от оси  $Ox$ ;  $\varphi_1, \varphi_2$  — углы поворота ведущих колес (с центрами в точках  $C_3$  и  $C_4$  соответственно) относительно горизонтальных осей. Так как рассматриваемый робот является электромеханической системой, содержащей два контура с токами, вектор его обобщенных координат  $\mathbf{q} = |x \ y \ \psi \ \varphi_1 \ \varphi_2 \ e_1 \ e_2|^T$  включает также заряды  $e_1, e_2$  такие, что  $i_1 = \dot{e}_1, i_2 = \dot{e}_2$  представляют собой токи в цепях питания электродвигателей. Соответственно вектор обобщенных скоростей рассматриваемой системы имеет вид  $\dot{\mathbf{q}} = |\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\psi} \ \dot{\varphi}_1 \ \dot{\varphi}_2 \ \dot{e}_1 \ \dot{e}_2|^T$  (точка обозначает дифференцирование по времени).

Обобщенные скорости удовлетворяют трем уравнениям неголономных связей, поэтому рассматриваемый мобильный робот имеет четыре степени свободы, и вектор его псевдоскоростей  $\dot{\boldsymbol{\pi}} = |V \ \Omega \ i_1 \ i_2|^T$  включает четыре элемента: скорость  $V = \dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi$  точки  $A$ , угловую скорость платформы  $\Omega = \dot{\psi}$  и токи  $i_1 = \dot{e}_1$ ,  $i_2 = \dot{e}_2$  во внешних цепях электродвигателей.

Динамические уравнения движения робота имеют вид

$$\begin{cases} m\dot{V} = \frac{nc}{r}(i_1 + i_2) - \mu_n V + \frac{1}{r}(M_{fr_1} + M_{fr_2}) + m_1 a \Omega^2, \\ J\dot{\Omega} = \frac{nc l}{r}(i_1 - i_2) - \mu_b \Omega + \frac{l}{r}(M_{fr_1} - M_{fr_2}) - m_1 a V \Omega, \\ L \frac{di_1}{dt} + R i_1 + \frac{nc}{r}(V + l \Omega) = U_1, \\ L \frac{di_2}{dt} + R i_2 + \frac{nc}{r}(V - l \Omega) = U_2, \end{cases} \quad (1)$$

где  $m = m_1 + 2m_k + 2\frac{J_y}{r^2}$ ;  $J = J_1 + (m_1 + 2m_k)a^2 + 2\frac{J_y}{r^2}l^2$ ;  $m_1$  — суммарная масса платформы, оптронной матрицы и статоров электродвигателей;  $m_k$  — суммарная масса ведущего колеса и ротора электродвигателя;  $J_1$  — момент инерции робота относительно вертикальной оси, проходящей через его центр масс  $C_1$ ;  $J_y = J_{ky} + n^2 J_{ry}$  — «приведенный» момент инерции колеса;  $J_{ky}$  — момент инерции колеса относительно горизонтальной оси;  $J_{ry}$  — момент инерции ротора электродвигателя;  $n$  — передаточное число редуктора;  $a = AC_1$  — расстояние от точки  $A$  до центра масс робота  $C_1$ ;  $c$  — коэффициент электромеханического взаимодействия;  $\mu_n, \mu_b$  — коэффициенты вязкого трения для поступательного и вращательного движения робота соответственно ( $\mu_n V = R$ ,  $\mu_b \Omega = M_R$  (рис. 1));  $M_{fr_1}, M_{fr_2}$  — моменты трения качения;  $L$  — обобщенная индуктивность цепи электродвигателя;  $R$  — омическое сопротивление цепи ротора;  $U_1, U_2$  — управляющие напряжения, приложенные к электродвигателям.

Существенным отличием настоящих уравнений от предложенных ранее является учет влияния моментов трения качения, действующих на ведущие колеса.

Значения  $M_{fr_k}$  ( $K = 1, 2$ ) из уравнений (1) определяются следующим образом:

$$M_{fr_k} = \begin{cases} -\delta N_K \text{sign}(\dot{\phi}_K), \dot{\phi}_K \neq 0, \\ -nc i_K, \dot{\phi}_K = 0, |nc i_K| \leq \delta N_K, \\ -\delta N_K \text{sign}(i_K), \dot{\phi}_K = 0, |nc i_K| > \delta N_K, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\delta$  — коэффициент трения качения;  $N_K$  — сила нормальной реакции горизонтальной опорной плоскости, действующей на  $K$ -ое ведущее колесо.

Для определения значений  $N_1$  и  $N_2$  был применен принцип Даламбера. Указанный принцип позволил разработать расчетные схемы, представленные на рис. 2., где  $\Phi_n$  — центробежная сила инерции, определяемая нормальным ускорением  $\mathbf{a}_n$ ;  $\Phi_\tau$  — сила инерции, определяемая тангенциальным ускорением  $\mathbf{a}_\tau$ ;  $\mathbf{M}_\varepsilon$  — момент инерции, определяемый ускорением  $\dot{\boldsymbol{\Omega}}$ ;  $\mathbf{M}_{z_1}$  — равнодействующий моментов  $\mathbf{M}_\varepsilon$ ,  $\mathbf{M}_R$ , моментов, определяемых силами  $\Phi_n$  и  $\Phi_\tau$ , и момента, определяемого силами  $\mathbf{M}_{fr_1}/r$  и  $\mathbf{M}_{fr_2}/r$ ;  $\mathbf{G}$  — вес робота;  $\mathbf{V}_c$  — скорость центра масс робота.

Равнодействующая параллельных оси  $Ay_1$  составляющих сил  $\Phi_n$  и  $\Phi_\tau - \Phi_{y_1}$  совместно с равнодействующей сил трения скольжения (при покое)  $F_{fr_1}$  и  $F_{fr_2}$  образует пару сил, влияние которой определяет изменение сил нормальной шероховатой плоскости  $N_1$  и  $N_2$  при движении робота вдоль криволинейных траекторий. С учетом указанного изменения значения  $N_1$  и  $N_2$  при отсутствии поперечного проскальзывания ведущих колес определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{m_1 + 2m_k}{2} \left( \frac{ga_1}{a + a_1} + \frac{r((V^2 + (\Omega a)^2)\cos\beta\text{sign}(\Omega) + \dot{\Omega}a\rho)}{l\rho} \right), \\ N_2 &= \frac{m_1 + 2m_k}{2} \left( \frac{ga_1}{a + a_1} - \frac{r((V^2 + (\Omega a)^2)\cos\beta\text{sign}(\Omega) + \dot{\Omega}a\rho)}{l\rho} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения;  $a_1 = C_1C_2$  — расстояние от центра масс робота  $C_1$  до точки крепления опоры  $C_2$ ;  $\rho = BC_1$  — радиус кривизны траектории движения центра масс робота.

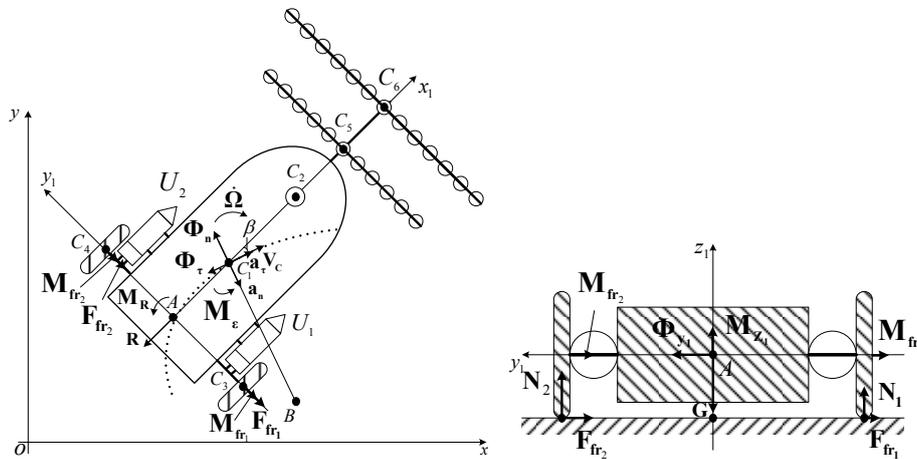


Рис. 2. Расчетные схемы мобильного робота для определения сил нормальной реакции шероховатой плоскости, действующих на ведущие колеса

Движение робота без поперечного проскальзывания ведущих колес предполагает выполнение условия, выражающегося следующим неравенством (предполагается модель сухого трения Кулона):

$$(m_1 + 2m_k) \left| \frac{(V^2 + (\Omega a)^2)\cos\beta\text{sign}(\Omega)}{\rho} + \dot{\Omega}a \right| < (N_1 + N_2)f, \quad (4)$$

где  $f$  — коэффициент трения скольжения.

Также в главе приведено описание системы автоматического управления движением робота, реализующей исследованные методы. Предложенный метод нечеткого управления движением предполагает определение отклонений от заданной траектории по сигналам двух оптронных линеек и расчет управляющих напряжений на основе логического вывода по нечетким правилам, синтезированным в результате обучения нейронной сети с последующей оптимизацией. При этом установлено, что увеличение расстояния между полюсом робота и центрами линеек ( $AC_5, AC_6$ ), а также между центрами линеек ( $C_5C_6$ ) увеличивает предиктивные свойства сенсорной системы. Однако указанное увеличение ограничивается величиной максимальной кривизны обрабатываемых траекторий и конструктивными особенностями робота.

Структурная схема системы автоматического управления движением робота представлена на рис. 3.

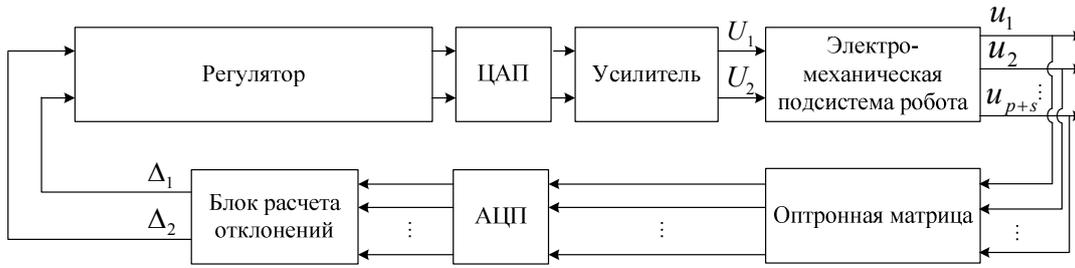


Рис. 3. Структурная схема системы автоматического управления движением робота

Сигнал оптронной матрицы (в системе с контроллером) в общем случае представляет собой импульсы, следующие с периодом  $T$  ( $T$  — длительность цикла управления, включающего измерение соответственно линейками I и II отклонений  $\Delta_1, \Delta_2$  и расчет управляющих напряжений  $U_1, U_2$ ), определяемые значениями напряжений на внутреннем сопротивлении контроллера в цепях фототранзисторов оптронных линеек I и II следующим образом:

$$u_k = \begin{cases} 1, & U_k > U_c, \\ 0, & U_k \leq U_c, \end{cases} \quad (5)$$

где  $u_k$  — сигнал  $k$ -го фотодатчика матрицы;  $U_k$  — напряжение на внутреннем сопротивлении контроллера в цепи фототранзистора  $k$ -го фотодатчика матрицы;  $U_c$  — пороговое напряжение, определяемое аппаратным обеспечением контроллера.

Указанные импульсы имеют вид  $\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1^T & \mathbf{u}_2^T \end{bmatrix}^T$ , где  $\mathbf{u}_1 = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & \dots & u_p \end{bmatrix}^T$ ;

$\mathbf{u}_2 = \begin{bmatrix} u_{p+1} & u_{p+2} & \dots & u_{p+s} \end{bmatrix}^T$ ;  $p, s$  — число фотодатчиков линеек I и II соответственно.

Графическая интерпретация сигнала оптронной матрицы представлена на рис. 4.

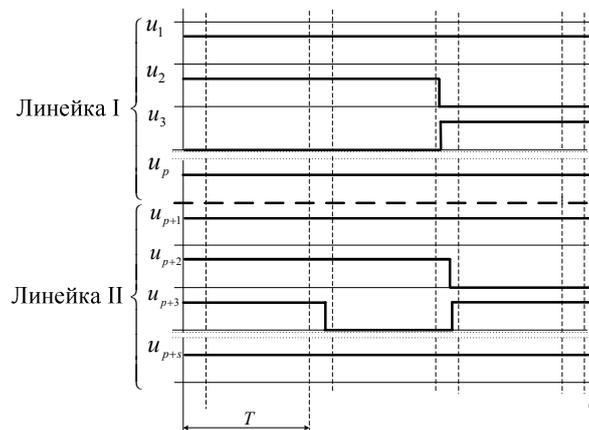


Рис. 4. Графическая интерпретация сигнала оптронной матрицы

Блок расчета отклонений  $\Delta_1, \Delta_2$  функционирует в соответствии с выражениями

$$\Delta_i(\mathbf{u}_i) = \begin{cases} \left(\frac{p+1}{2} - N_i\right)d, & \sum_{k=1}^p u_{k_i} = p-1, \\ z, & \sum_{k=1}^p u_{k_i} = p, \\ z, & \sum_{k=1}^p u_{k_i} < p-1, \end{cases} \quad \Delta_i(\mathbf{u}_i) = \begin{cases} \left(\frac{s+1}{2} - M_i + p\right)d, & \sum_{k=p+1}^{p+s} u_{k_i} = s-1, \\ z, & \sum_{k=p+1}^{p+s} u_{k_i} = s, \\ z, & \sum_{k=p+1}^{p+s} u_{k_i} < s-1, \end{cases} \quad (6)$$

где  $i$  — номер цикла управления;  $d$  — расстояние между соседними фотодатчиками;  $z$  — некоторое действительное число, модуль которого больше, чем модуль из-

меряемых линейкой II отклонений;  $N_i \in [1, p]$ ,  $M_i \in [p + 1, p + s]$  — номера фотодатчиков соответственно линейек I и II с нулевым сигналом. Следует отметить, что контрастная (темная) полоса может проходить между двумя соседними фотодатчиками, либо не затемняя в достаточной степени освещаемые светодиодами участки поверхности, либо затемняя их. В таких случаях значение  $\Delta_1$  либо  $\Delta_2$  не является значением отклонения — оно является некоторым условным значением  $z$ , интерпретируемым регулятором как сигнал о невозможности измерения отклонения.

С учетом того, что максимальное значение напряжения бортового аккумулятора определяется значением  $U_b$ , регулятор функционирует следующим образом:

$$U_i = \begin{cases} 0, U_i = 0, \\ U_0 + U_i, U_i \neq 0, |U_0 + U_i| \leq U_b, \\ U_b \text{sign}(U_0 + U_i), U_i \neq 0, |U_0 + U_i| > U_b, \end{cases} \quad U_{2_i} = \begin{cases} 0, U_i = 0, \\ U_0 - U_i, U_i \neq 0, |U_0 - U_i| \leq U_b, \\ U_b \text{sign}(U_0 - U_i), U_i \neq 0, |U_0 - U_i| > U_b, \end{cases} \quad (7)$$

где  $U_0$  — базовое напряжение (подается на двигатели при отсутствии отклонения от заданной траектории движения).

Расчет значения  $U_i$  осуществляется в соответствии с соотношением

$$U_i = \begin{cases} F(\Delta_{1_{i-1}}, \Delta_{2_{i-1}}), \Delta_{1_{i-1}} \neq z \wedge \Delta_{2_{i-1}} \neq z, \\ 0, \Delta_{1_{i-1}} = z \vee \Delta_{2_{i-1}} = z, \end{cases} \quad (8)$$

где

$$F(\Delta_{1_{i-1}}, \Delta_{2_{i-1}}) = k_p \Delta_{1_{i-1}} + k_d \left( \frac{\Delta_{1_{i-1}} - \Delta_{1_{i-2}}}{T} \right) + k(\Delta_{2_{i-1}} - \Delta_{1_{i-1}}) |\Delta_{2_{i-1}}|, \quad (9)$$

где  $k_p, k$  — коэффициенты пропорциональности;  $k_d$  — коэффициент дифференцирования.

Для исследования управляемого движения робота использовались четыре закона управления, три из которых представляют собой частные случаи выражения (9). Для первого закона  $k_p \neq 0$ ,  $k_d = 0$ ,  $k = 0$ ; для второго —  $k_p \neq 0$ ,  $k_d \neq 0$ ,  $k = 0$ ; для третьего —  $k_p \neq 0$ ,  $k_d \neq 0$ ,  $k \neq 0$ . Четвертый закон синтезирован на базе нейтрософского (обобщенного нечеткого) подхода с применением обучения нейронечеткой сети на выборке кортежей вида  $\left\langle \Delta_{1_{i-1}}, \frac{\Delta_{1_{i-1}} - \Delta_{1_{i-2}}}{T}, (\Delta_{2_{i-1}} - \Delta_{1_{i-1}}) |\Delta_{2_{i-1}}|, U_i \right\rangle$ , полученной в ходе моделирования движения робота, управляемого с применением третьего закона. Зависимости «входы-выход» закона нечеткого управления представлены на рис. 5.

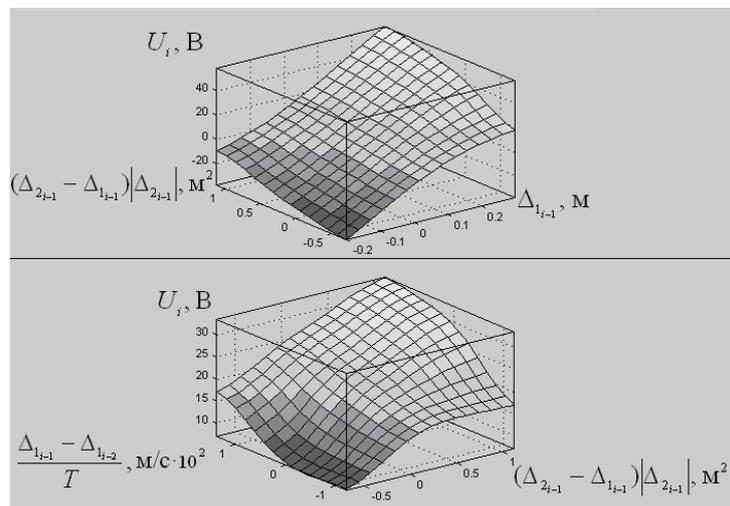


Рис. 5. Графики зависимостей «входы-выход» для закона нечеткого управления

Параметры законов подбирались на основе математического моделирования управляемого движения робота вдоль  $s$ -образной траектории, заданной сигмоидой (рис. 6). При этом решалась задача оптимизации, в рамках которой осуществлялся поиск максимального значения функции качества движения в зависимости от значений коэффициентов  $k_p, k_d, k$  и значения  $U_0$ . Указанная функция имеет вид

$$q = \begin{cases} \frac{1}{\sum_{i=1}^M |\Delta_{i_i}|}, \forall i: (m_1 + 2m_k) \left| \frac{(V^2 + (\Omega a)^2) \cos \beta \operatorname{sign}(\Omega) + \dot{\Omega} a}{\rho} + \dot{\Omega} a \right| < (N_1 + N_2) f \wedge N_1 \geq 0 \wedge N_2 \geq 0 \wedge \forall i \geq S: \sum_{i+1-S}^i |\Delta_{i_i}| \neq Sz, \\ 0, \exists i: (m_1 + 2m_k) \left| \frac{(V^2 + (\Omega a)^2) \cos \beta \operatorname{sign}(\Omega) + \dot{\Omega} a}{\rho} + \dot{\Omega} a \right| \geq (N_1 + N_2) f \vee N_1 < 0 \vee N_2 < 0 \vee \exists i \geq S: \sum_{i+1-S}^i |\Delta_{i_i}| = Sz, \end{cases} \quad (10)$$

где  $\Delta_{i_i}$  — сигнал линейки I на  $i$ -ом цикле управления;  $M$  — число итераций управления, осуществляемых при движении полюса от точки «Старт» до точки «Финиш»;  $S$  — число следующих друг за другом импульсов сигнала линейки I о невозможности осуществить измерение отклонения (параметр критерия потери наблюдаемости). Максимальное значение этого показателя соответствует максимальному качеству управляемого движения по критерию «быстродействие×точность» при выполнении условий отсутствия поперечного проскальзывания ведущих колес, отрыва ведущего колеса от горизонтальной шероховатой плоскости и потери наблюдаемости системы.

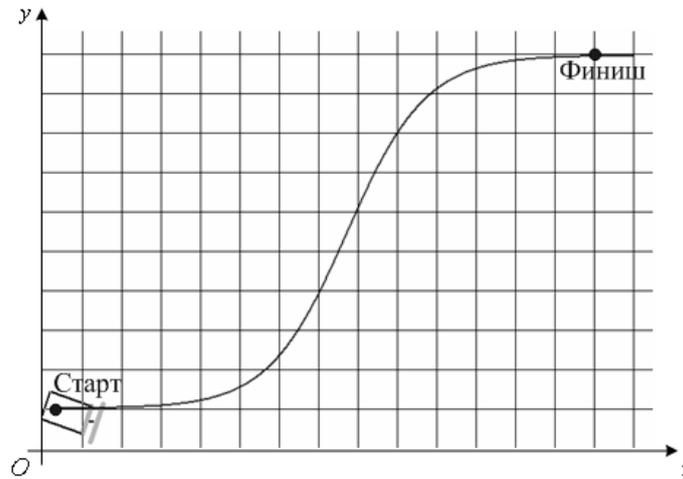


Рис. 6. Заданная траектория движения

Параметр первого закона был определен на базе решения задачи полного перебора, параметры остальных законов — с использованием генетического алгоритма. Для осуществления моделирования параметры математической модели были инициализированы следующим образом:  $m_1=4,15$  кг;  $m_k=1,1$  кг;  $J_1=0,7$  кг·м<sup>2</sup>;  $J_{ky}=0,00028$  кг·м<sup>2</sup>;  $J_{ry}=0,00003$  кг·м<sup>2</sup>;  $n=5$ ;  $a=0,15$  м;  $a_1=0,25$  м;  $c=0,01$  В·с;  $\mu_n=0,04$   $\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}}$ ;  $\mu_b=0,08$   $\frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$ ;  $L=0,0002$  Гн;  $R=1$  Ом;  $l=0,2$  м;  $r=0,075$  м;  $f=0,7$ ;  $\delta=0,00075$  м;  $T=0,01$  с;  $U_b=24$  В;  $p=25$ ;  $s=35$ ;  $d=0,025$  м;  $z=100$ ;  $S=10$ ;  $AC_5=0,875$  м;  $AC_6=1,125$  м. Начальные условия были следующими:  $x=0,3$  м;  $y=1$  м;  $\psi=0$ ;  $\varphi_1=0$ ;  $\varphi_2=0$ ;  $i_1=0$ ;  $i_2=0$ ;  $V=0$ ;  $\Omega=0$ ;  $\Delta_1=\Delta_2=0$ . Конечным условием было:  $x \geq 14,05$  м.

Уравнения движения (1) совместно с выражениями (2,3), а также соотношениями (5-9), описывающими функционирование системы управления движением, формируют предложенную математическую модель робота.

Также в главе предложен алгоритм математического моделирования управляемого движения робота, предусматривающий решение дифференциальных уравнений численным методом с адаптивным шагом интегрирования.

**В третьей главе** проанализированы результаты численных исследований динамики управляемого движения робота вдоль заданной траектории (рис. 6).

Значения функции качества движения  $q$  для исследованных законов управления представлены в таблице 1.

Таблица 1

Показатели качества управляемого движения

Закон управления	П-управление по сигналу линейки I	ПД-управление по сигналу линейки I	«Детерминированное» управление по сигналу матрицы	Нечеткое управление по сигналу матрицы
Время отработки траектории, с	9,9	8,35	8	8,28
$ \bar{\Delta}_1 $ , м	0,043	0,049	0,036	0,019
$q, \frac{1}{\text{м} \cdot \text{с}}$	2,35	2,44	3,47	6,36

Данные таблицы 1 свидетельствуют том, что метод нечеткого управления движением по сигналу оптронной матрицы обеспечивает повышение качества отработки заданной траектории в сравнении с существующими методами управления (П- и ПД-управления) по сигналу оптронной линейки по критерию «быстродействие×точность» на 160-170%. Это повышение обеспечивается увеличением точности движения, что отражено на рис. 7, где представлены временные диаграммы отклонения  $\Delta_1$ .

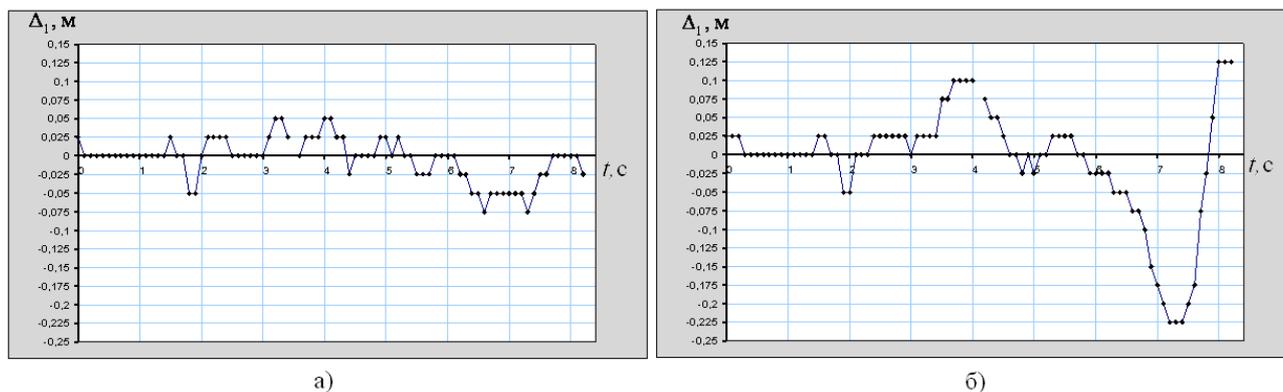


Рис. 7. Временные диаграммы отклонения, измеряемого линейкой I, при невозмущенном движении:

- а — для нечеткого управления по сигналу матрицы;  
 б — для ПД-управления по сигналу линейки I

Нечеткое управление по сигналу оптронной матрицы обеспечивает курсовую устойчивость возмущенного движения, при котором робот до начала перемещения отклонен от заданной траектории (рис. 6). На рис. 8 представлены временные диаграммы отклонения  $\Delta_1$  для случая возмущенного движения робота, когда начальное отклонение было максимально возможным ( $|12d|$  по линейке I,  $d$  — расстояние между соседними фотодатчиками линеек) при сохранении наблюдаемости системы. В случае с использованием П-регулятора система становится ненаблюдаемой в силу неустойчивости движения.

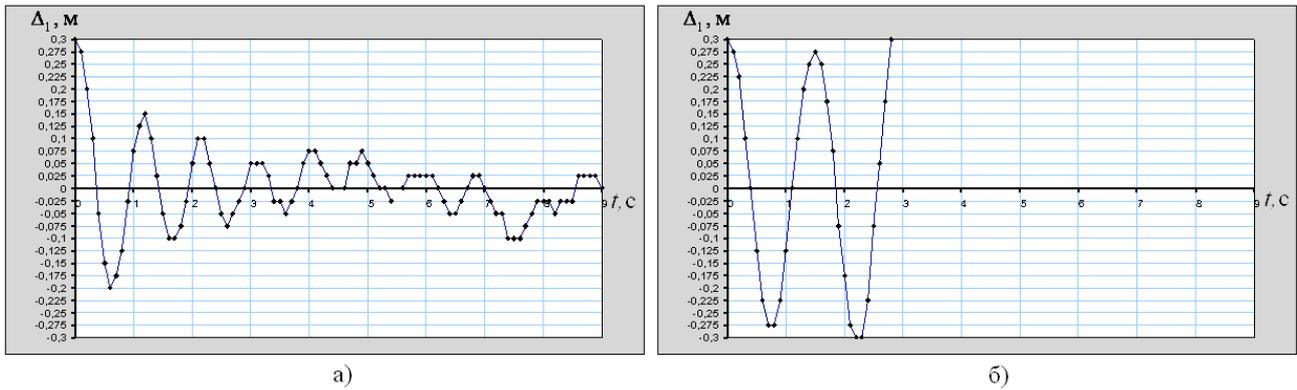


Рис. 8. Временные диаграммы отклонения, измеряемого линейкой I, при возмущенном движении:

- а — для нечеткого управления по сигналу матрицы;  
 б — для ПД-управления по сигналу линейки I

В главе представлены временные диаграммы характеристик управляемого движения робота, отражающие динамические особенности, определяемые используемыми законами управления. Некоторые из них представлены на рис. 9 и 10.

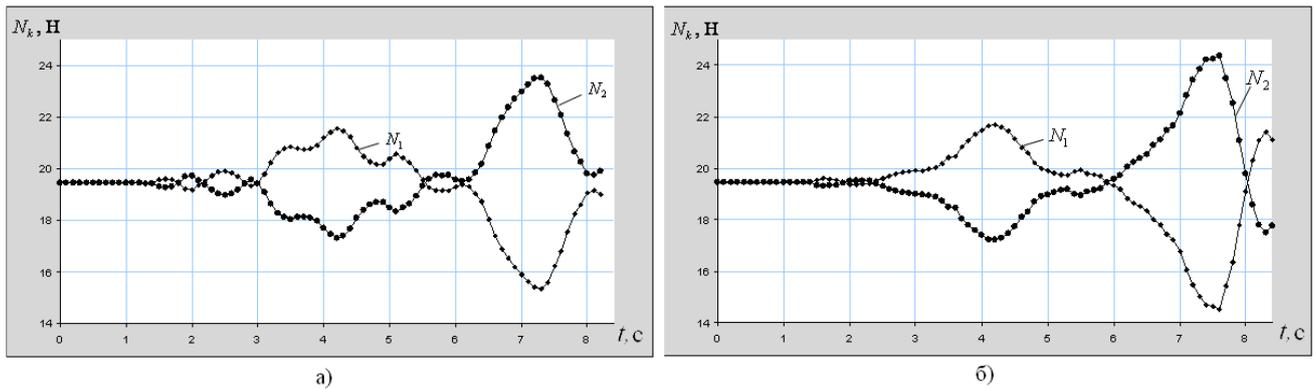


Рис. 9. Временные диаграммы модулей сил нормальной реакции шероховатой плоскости, действующих на ведущие колеса:

- а — для нечеткого управления по сигналу матрицы;  
 б — для ПД-управления по сигналу линейки I

Изменение действующих на ведущие колеса сил нормальной реакции опорной плоскости приводит к изменению моментов трения качения, что при больших значениях «приведенного» коэффициента трения качения  $\delta/r$  может существенно влиять на динамику робота.

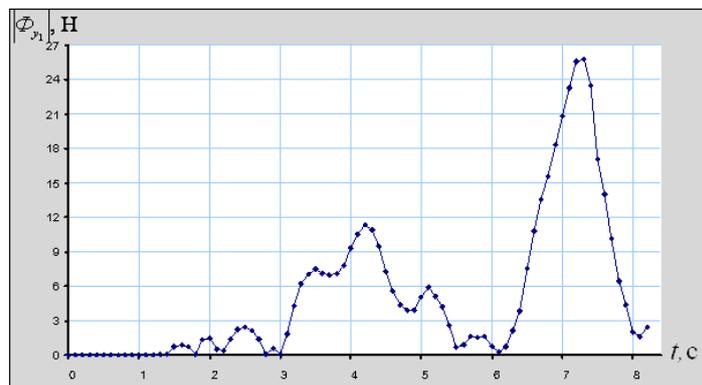


Рис. 10. Временная диаграмма модуля силы  $\Phi_{y_1}$  для ПД-управления по сигналу линейки I

Временная диаграмма на рис. 10 с учетом того, что в соответствии с принятыми параметрами математической модели  $(N_1 + N_2)f = 27,23 \text{ Н}$ , свидетельствует о движении робота на участке между 7 с и 8 с на границе возникновения поперечного проскальзывания ведущих колес.

Определены области значений скорости полюса робота и модуля угловой скорости его платформы, предполагающих: движение вдоль криволинейных траекторий без поперечного проскальзывания и с поперечным проскальзыванием ведущих колес; движение вдоль криволинейных траекторий без отрыва и с отрывом ведущего колеса от горизонтальной шероховатой плоскости при качении ведущих колес без поперечного проскальзывания для различных значений высоты центра масс робота  $h$  (рис. 11). Следует отметить, что в выражении (3)  $r = h$ .

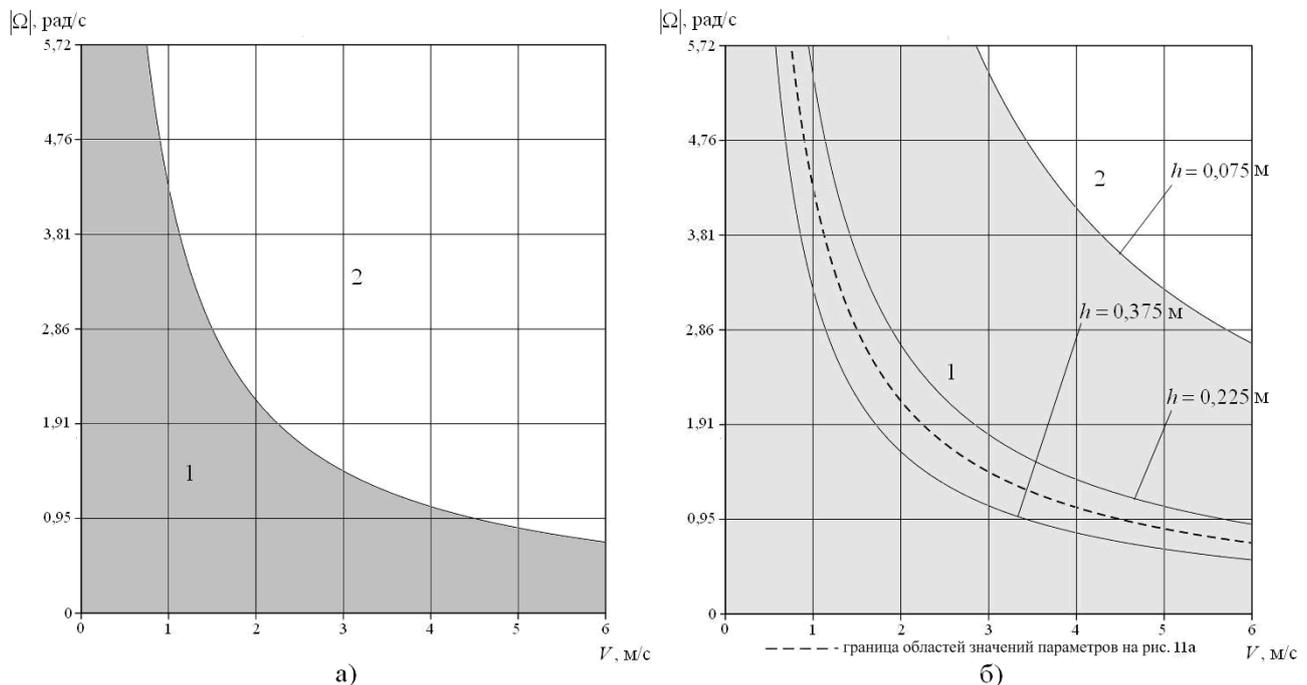


Рис. 11. Области значений параметров движения робота:

а1 — без поперечного проскальзывания ведущих колес;

а2 — с поперечным проскальзыванием ведущих колес;

б1 — без отрыва ведущего колеса от горизонтальной шероховатой плоскости;

б2 — с отрывом ведущего колеса от горизонтальной шероховатой плоскости

Также проведены численные исследования влияния значения коэффициента трения качения  $\delta$  на точность управляемого движения робота. При этом для каждого закона управления при увеличении значения  $\delta$  увеличивалось значения  $U_0$  с целью обеспечения уровня быстродействия, соответствующего минимальному исследуемому значению  $\delta$ . Результаты указанных исследований представлены на рис. 12. Они свидетельствуют об отсутствии существенной зависимости точности отработки заданной траектории от значения коэффициента трения качения для законов управления по сигналу оптронной матрицы и об ее обратной зависимости от значения коэффициента трения качения для исследованного управления по сигналу оптронной линейки.

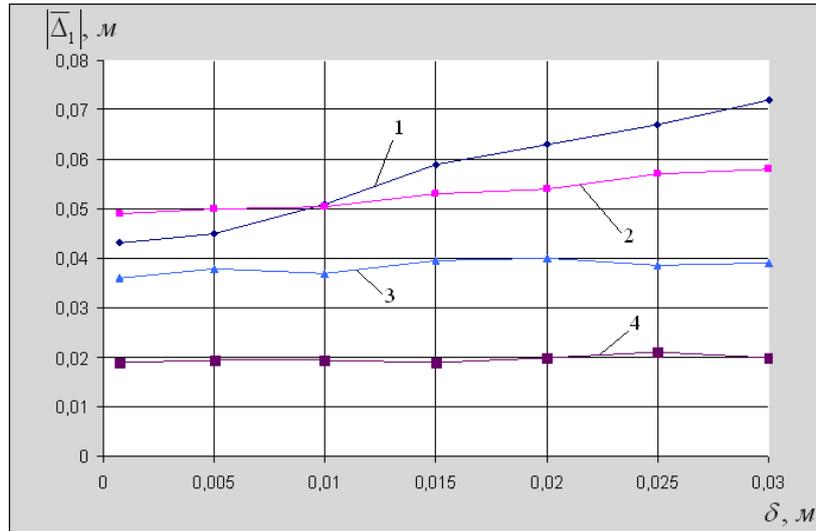


Рис. 12. Графики зависимости среднего модуля ошибки обработки заданной траектории движения от значения коэффициента трения качения:

- 1 — для П-управления по сигналу линейки I;
- 2 — для ПД-управления по сигналу линейки I;
- 3 — для «детерминированного» управления по сигналу оптронной матрицы;
- 4 — для нечеткого управления по сигналу оптронной матрицы

Рассмотрен случай, когда для каждого ведущего колеса введен отдельный коэффициент трения. При этом коэффициенты трения качения  $\delta_1, \delta_2$  являлись случайными, равномерно распределенными в интервале  $[0,00075 \text{ м}; 0,03 \text{ м}]$  величинами. Значение  $U_0$  для всех законов управления было одинаковым (5 В) для обеспечения одного и того же (приблизительно) уровня быстродействия. При таких условиях, исходя из средних значений  $|\bar{\Delta}_1|$  для двадцати экспериментов, точность управляемого движения в сравнении с оптимизированным при использовании нечеткого управления по сигналу матрицы снизилась на 3%, при использовании «детерминированного» управления по сигналу матрицы — на 7%, для ПД-управления по сигналу линейки I — на 15%, для П-управления по сигналу линейки I — на 24%. Это свидетельствует о том, что применение предложенного метода управления обеспечивает более высокую робастность системы управления движением робота в сравнении со случаями использования других исследованных методов управления.

**В четвертой главе** изложена методика экспериментальных исследований, позволивших оценить степень соответствия разработанной математической модели реальному объекту — экспериментальному образцу. Его общий вид представлен на рис 13.

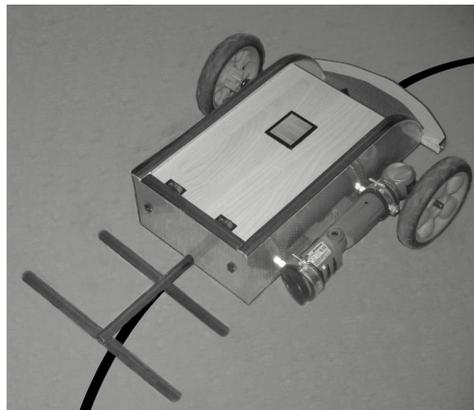


Рис. 13. Общий вид прототипа мобильного робота с двумя независимыми ведущими колесами

Экспериментальный образец оснащен двумя датчиками углов поворота ведущих колес и бесконтактным оптическим датчиком скорости полюса робота. Такой набор датчиков предоставляет возможность получать экспериментальные значения скорости полюса робота  $V_{\Omega}$  и угловой скорости его платформы  $\Omega_{\Omega}$  с учетом того, что он позволяет контролировать выполнение условия непроскальзывания ведущих колес, сравнивая скорость полюса робота, рассчитываемую на основе экспериментальных значений угловых скоростей роторов электродвигателей, со скоростью, измеряемой датчиком.

Блок-схема комплекса для исследования характеристик движения робота представлена на рис. 14.

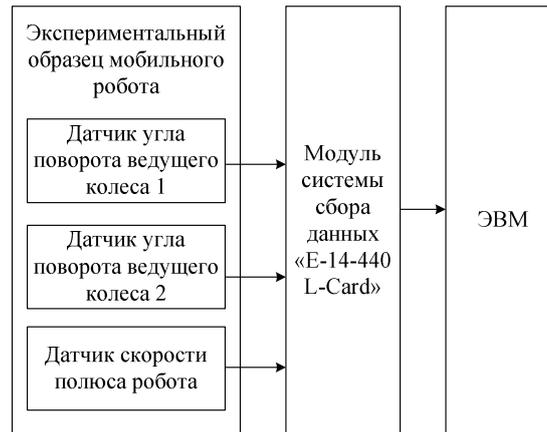


Рис. 14. Блок-схема комплекса для исследований характеристик управляемого движения робота: стрелками обозначена передача данных

На временных диаграммах, представленных на рис. 15, осуществлено сравнение значений  $V_{\Omega}$  и  $\Omega_{\Omega}$ , полученных экспериментально, с их расчетными значениями  $V$  и  $\Omega$  для случая применения нечеткого управления по сигналу оптронной матрицы. На основе указанного сравнения с учетом погрешности (не более 10%), допускаемой комплексом для исследования характеристик управляемого движения робота, можно заключить, что разработанная математическая модель является в достаточной степени адекватной реальному объекту.

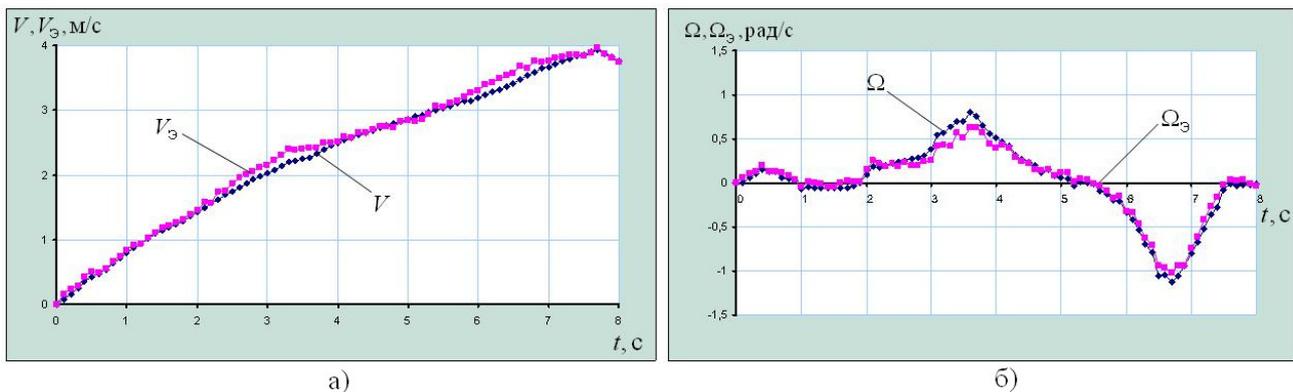


Рис. 15. Временные диаграммы характеристик движения робота:  
а — расчетная и эксперим. скорости полюса робота;  
б — расчетная и эксперим. угловые скорости платформы

Также в рамках главы дано описание разработанного программного средства, предназначенного для разработки и отладки алгоритмов управления движением робота на базе моделирования его управляемого движения в реальном масштабе времени; представлены разработанные предложения по применению мобильных роботов, прототипом которых является созданный экспериментальный образец.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертации предложено решение актуальной задачи повышения качества функционирования мобильных роботов с двумя независимыми ведущими колесами, в основе которой лежит развитие математической модели и исследование динамики этих мехатронных систем, а также разработка метода управления их движением. Проведенные исследования позволили получить следующие результаты:

1. Разработана математическая модель, описывающая электромеханическую подсистему и подсистему управления движением мобильного робота с двумя независимыми ведущими колесами с учетом особенностей взаимодействия этих колес с горизонтальной шероховатой плоскостью при движении вдоль криволинейных траекторий. Ее адекватность подтверждена экспериментально.

2. Выявлены закономерности управляемого различными методами движения робота вдоль заданной  $s$ -образной траектории, анализ которых показал, что нечеткое управление по сигналу оптронной матрицы в сравнении с «детерминированным» управлением по сигналу оптронной линейки обеспечивает повышение качества движения по критерию «быстродействие×точность» на 160-170%.

3. Предложен способ синтеза нечетких регуляторов, основанный на применении нейро-нечеткой сети, обобщенного нечеткого подхода и генетического алгоритма, позволяющий синтезировать управление, качество которого существенно превышает качество оптимального управления, основанного на традиционных подходах.

4. Определены области значений параметров движения робота, обеспечивающих отсутствие поперечного проскальзывания ведущих колес и отрыва ведущего колеса от горизонтальной шероховатой плоскости.

5. Установлено отсутствие существенной зависимости точности отработки заданной траектории от значения коэффициента трения при использовании предложенного метода управления движением. В то же время такая зависимость обратного характера выявлена для случаев использования существующих методов управления движением по сигналу оптронной линейки.

6. Разработано программное приложение, обеспечивающее возможность разработки и отладки алгоритмов управления движением робота на базе моделирования его управляемого движения в реальном масштабе времени.

7. Создан экспериментальный образец робота, оснащенный системой управления движением, реализующей разработанный метод, и системой измерения параметров движения. Разработана методика экспериментальных исследований движения робота, позволившая на основе натуральных испытаний экспериментального образца установить достаточную степень соответствия предложенной математической модели реальному объекту в условиях действия факторов, исключенных из рассмотрения принятыми допущениями.

### **Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:**

#### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Бартнев, В.В. Динамика управляемого движения мобильных колесных роботов по сигналу оптронной матрицы [Текст] / В.В. Бартнев, С.Ф. Яцун // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – №5(2). – С. 254-259.

#### **Другие публикации:**

2. Бартнев, В.В. Применение алгоритмов нечеткой логики в автоматических системах управления [Текст] / В.В. Бартнев, С.Ф. Яцун // Вибрационные машины и технологии: сборник научных трудов международной конференции. – Курск: КурскГТУ, 2008. – С. 812-820.

3. Бартенеv, В.В. Анализ возможностей применения интервальной нейтрософской логики в интеллектуальных системах управления мобильных роботов [Текст] / В.В. Бартенеv, С.Ф. Яцун // Интегрированные модели, мягкие вычисления, вероятностные системы и комплексы программ в искусственном интеллекте: сборник научных трудов научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов. – М.: Физматлит, 2009. Ч. 2. – С. 50-61.

4. Бартенеv, В.В. Повышение качества функционирования комбинированного нечеткого регулятора системы управления движением на базе применения нейтрософской логики [Текст] / В.В. Бартенеv, С.Ф. Яцун // Интегрированные модели и мягкие вычисления: сборник научных трудов 5-й международной научно-практической конференции. – М.: Физматлит, 2009. Ч. 2. – С. 799-807.

5. Бартенеv, В.В. Математическая модель управляемого движения мобильного колесного робота по шероховатой горизонтальной плоскости в вязкой среде [Текст] / В.В. Бартенеv, С.Ф. Яцун, I. Zeidis, K. Zimmermann // Управляемые вибрационные технологии и машины: сборник научных статей международной конференции. – Курск: КурскГТУ, 2010. Ч. 2. – С. 234-247.

6. Бартенеv, В.В. Управление движением материальной точки по шероховатой плоскости в вязкой среде с использованием оптимального комбинированного нечеткого регулятора [Текст] / В.В. Бартенеv, С.Ф. Яцун // Управляемые вибрационные технологии и машины: сборник научных статей международной конференции. – Курск: КурскГТУ, 2010. Ч. 2. – С. 284-298.

7. Bartenev, V.V. Application of the combined neutrosophic PID controller to motion control of a mobile object [Text] / V.V. Bartenev // Proceedings of the 16th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – Saint Petersburg: State Research Center of the Russian Federation – Central Scientific & Research Institute «Elektropribor», 2009. – P. 264-268.

8. Bartenev, V.V. Motion control of mobile wheeled robots on the base of the signal of optron matrix [Text] / V.V. Bartenev, S.F. Yatsun // Proceedings of the 17th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – Saint Petersburg: State Research Center of the Russian Federation – Central Scientific & Research Institute «Elektropribor», 2010. – P. 279-284.

9. Эмулятор движения мобильного колесного робота: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010613625 Российская Федерация / Бартенеv В.В.; правообладатель: ГОУ ВПО «Курский государственный технический университет»; заявл. 20.04.2010; зарегистрировано 02.06.2010.

10. Мобильный робот с оптронной матрицей: пат. на полезную модель №99253 Российская Федерация: МПК H01S 3/00 / Яцун С.Ф., Бартенеv В.В., Савин С.И., Аль-Еззи А.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет». – №2010124311/28; заявл. 15.06.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. №31.

Подписано в печать 16.11.10. Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 130 экз. Заказ 1034.

Издательство Юго-Западного государственного университета

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

Отпечатано: ПБОЮЛ Киселева О.В.

ОГРН 304463202600213