

На правах рукописи



Шаветов Сергей Васильевич

**АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ
СЛОЖНЫМИ МЕХАТРОННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(в технических системах)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Бобцов Алексей Алексеевич

Официальные оппоненты: **Розенвассер Ефим Натанович**
доктор технических наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный
морской технический университет,
заведующий кафедрой «Автоматизированные
корабельные комплексы и информационно-
управляющие системы»

Сыроквашин Владислав Викторович
кандидат технических наук
Санкт-Петербургский государственный
технологический институт (технический
университет), кафедра
Автоматизации процессов
химической промышленности, доцент

Ведущая организация: Институт проблем машиноведения
Российской Академии наук

Защита состоится 25 сентября 2014 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.227.03 при Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики по адресу: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, ауд. 466.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики по адресу: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49 и на сайте <http://fpro.ifmo.ru>.

Автореферат разослан «___» июля 2014 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета,



Дударенко Наталия Александровна

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Развитие современной техники все больше указывает на тесную интеграцию аппаратных и программных частей устройств, которая выливается в интегральные мехатронные системы (Изерманн). Крупным классом мехатронных комплексов являются мобильные робототехнические системы. Подобные роботы могут иметь различные конструкции, но основными являются колесные, гусеничные и шагающие. Анализ современных достижений в области роботостроения позволяет сделать вывод о том, что у мобильных роботов основные сложности возникают в первую очередь с системами управления, с «интеллектом», а уже потом с механизмами или частями конструкции. Главным образом это связано с тем, что для многих современных робототехнических объектов сложно построить адекватную математическую модель из-за отсутствия необходимых предварительных данных, либо из-за непредсказуемого изменения объекта в процессе его жизни (Мирошник, Никифоров, Фрадков). Число подобного рода объектов управления сегодня быстро увеличивается в связи с развитием механики, сенсорных устройств, микропроцессоров, тем самым увеличивая количество неопределенностей в задачах управления. Неопределенности могут иметь различную природу и вызываться неточным заданием математической модели объекта управления, характеристиками среды функционирования или целевого условия. Параметрическая неопределенность объекта управления подразумевает отсутствие известных значений основных характеристик объекта либо зависимость свойств объекта от неизвестных параметров. Математическая модель также порождает структурную неопределенность, когда, например, одна и та же система может описываться дифференциальными уравнениями, как второго порядка, так и пятого. Например, в электроприводах, зачастую, при синтезе регулятора пренебрегают динамикой быстрых процессов, свойственных объекту ввиду наличия различных электронных компонентов, люфтов и т.д.

Значительное влияние на поведение реальных систем управления оказывает среда функционирования с возмущающими воздействиями. В подавляющем большинстве практических случаев точная форма или характер поведения внешних воздействий остается неизвестным вплоть до начала работы системы управления. Для современных систем, построенных на базе цифровых контроллеров, компьютерная обработка алгоритмов управления, как правило, приводит к появлению запаздывания (Ричард). Наличие неучтенного запаздывания негативно отражается на устойчивости и качестве системы управления.

Большой интерес для исследователей представляют задачи пространственного движения (Бурдаков, Мирошник, Стельмаков), характеризующиеся неопределенностью цели, в которых эталонная траектория задана неточно или ее аналитическое описание априорно неизвестно, а для формирования управления используются только текущие измерения отклонений от траектории.

В современной теории автоматического управления особое внимание уделяется методам адаптивного и робастного управления по выходу (Баркана, Бобцов, Морс, Никифоров, Фуртат, Цыкунов). Мотивация данных научных исследований обусловлена тем, что управление по выходу позволяет уменьшить затраты на проектирование и разработку различных датчиков, которые в свою очередь, увеличивают размерность математической модели системы и вносят дополнительные погрешности, связанные с ошибками измерений.

Быстрое внедрение телекоммуникационных технологий и микропроцессорной техники в повседневную жизнь дало сильный толчок развитию «облачных» технологий, позволяющих конечным пользователям иметь повсеместный доступ к различным вычислительным ресурсам (серверам, приложениям, сервисам). Набирающей в последнее время все большую популярность является идея дистанционного управления удаленными от пользователя различными техническими объектами через глобальную сеть Интернет (Ортега, Хилл, Андриевский, Матвеев, Фрадков, Граничин и др.).

Диссертационная работа посвящена развитию методов адаптивного управления по выходу мобильными роботами в условиях рассмотренных неопределенностей и также с использованием канала связи глобальной сети Интернет, что, в свою очередь, обуславливает актуальность данного исследования.

Цели диссертационной работы. Целью диссертационной работы является разработка новых методов адаптивного управления функционально и структурно неопределенными динамическими объектами с последующим применением полученных методов в системах управления мобильными роботами, как с применением классических каналов связи, так и с использованием глобальной сети Интернет.

Методы исследований. При получении теоретических результатов использовались метод функций Ляпунова, методы теории обыкновенных дифференциальных уравнений, теории динамических систем и системного анализа, линейной алгебры, численных методов, методы инженерии программного обеспечения.

Численное моделирование проводилось с использованием пакета прикладных программ Matlab Simulink. Для получения экспериментальных результатов использовались мобильные роботы на базе Lego Mindstorms NXT и Parallax Voe-Bot. Система дистанционного управления разработана на языке node.js на основе библиотек socket.io, serialport и paparazzo. В качестве устройств для построения системы технического зрения в задаче дистанционного управления использовались видеокамеры EasyN F-M161, Wanscam JW0004, Foscam FI8907W, Tervis IPROBOT 2 и Trek Ai-Ball.

Научная новизна. В рамках данной работы получен новый закон адаптивного управления по выходу линейным параметрически неопределенным объектом с неизвестной относительной степенью. Впервые было доказано, что применение адаптивного регулятора, используемого для стабилизации линейного параметрически неопределенного объекта с неизвестной

относительной степенью, обеспечивает экспоненциальную устойчивость замкнутой нелинейной системы с неизвестными секторными нелинейностями. Разработана комплексная универсальная система дистанционного управления мехатронными объектами через глобальную сеть Интернет.

Практическая ценность. Практическая ценность работы заключается в потенциальной возможности использования полученных теоретических методов адаптивного управления для различных систем, функционирующих в условиях параметрической, функциональной и структурной неопределенностей. Полученные методы могут быть полезны при проектировании алгоритмов управления мобильными робототехническими устройствами такими, как колесные и гусеничные роботы. Разработанная универсальная система дистанционного управления мобильными роботами через Интернет может быть применена для большого класса технических проектов, в которых актуальна проблема использования канала связи, реализуемого с использованием глобальной сети Интернет.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Методы адаптивного управления по выходу линейным параметрически неопределенным объектом с неизвестной относительной степенью и нелинейным параметрически и функционально неопределенным объектом с известной относительной степенью.

2. Алгоритмы управления движением мобильного робота.

3. Система дистанционного управления мобильным роботом через глобальную сеть Интернет.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

- 18th IFAC World Congress, Milan, Italy, 2011.
- IEEE International Conference on Control Applications, Denver, USA, 2011.
- 9th IFAC Symposium Advances in Control Education, Nizhny Novgorod, Russia, 2012.
- IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control, Saint-Petersburg, Russia, 2013.

Результаты работы использованы при выполнении следующих НИОКР: госзадание 2014/190 «Развитие методов адаптивного и робастного управления сложными нелинейными системами с применением к мехатронным и робототехническим приложениям», программа повышения конкурентоспособности НИУ ИТМО (субсидия 074-U01), 220 Постановление Правительства Российской Федерации, проект номер 14Z50.31.0031 «Робастные и адаптивные системы управления, коммуникации и вычисления», гранте Российского фонда фундаментальных исследований № 09-08-00139, а также в

конкурсе У.М.Н.И.К. «Разработка двухколесной мобильной системы с интеллектуальной системой управления».

Полученные в ходе научно-исследовательской работы алгоритмы управления были успешно апробированы на мобильных робототехнических комплексах на базе Lego Mindstorms NXT и Parallax Voe-Bot.

Публикации. Автор диссертационной работы имеет 9 публикаций, 8 из которых напечатаны в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, 4 статьи размещены в международных базах данных Web of Science и Scopus.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве. В работе [1] соискателем предложена модификация закона управления для класса объектов с неизвестной относительной степенью. В статьях [2], [3], [5] соискателем приведен синтез алгоритмов управления движением мобильного робота вдоль неизвестной траектории и слежения за подвижным объектом, а также результаты экспериментальной апробации на реальных объектах. В работах [4] и [6] доказана экспоненциальная устойчивость замкнутой системы для нелинейного возмущенного объекта. В [7] автором разработана универсальная система дистанционного управления мобильными роботами через глобальную сеть Интернет. В статье [8] соискателем архитектура дистанционного управления дополнена системой технического зрения. В работе [9] автором предложено использование алгоритма управления из [2], [3], [5] в задаче слежения за объектом двухколесным балансирующим роботом.

Объем и структура работы. Диссертационная работа объемом 130 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность задач, рассматриваемых в диссертационной работе. Показана необходимость синтеза закона управления для объектов с неизвестной относительной степенью и необходимость разработки системы дистанционного управления мехатронными комплексами через глобальную сеть Интернет. Сформированы цели и задачи исследования и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертационной работы представлен краткий обзор современных мехатронных комплексов, представлена возможная их классификация, приведен обзор методов управления мобильными роботами и согласованного управления звеньями манипулятора.

Во второй главе представлена разработка методов адаптивного управления по выходу для нелинейных параметрически и функционально неопределенных возмущенных систем с запаздыванием с известной относительной степенью. Показана экспоненциальная устойчивость замкнутой системы. Размерность синтезированного регулятора равна $\rho - 1$, где ρ – относительная степень объекта управления. Представлен подход адаптивного управления по выходу для линейных параметрически неопределенных объектов с неизвестной относительной степенью.

Для достижения цели управления как для нелинейного объекта с известной относительной степенью, так и для линейного с неизвестной относительной степенью зададим обобщенную постановку задачи. Рассмотрим нелинейный объект в форме вход-состояние-выход:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}(t) = \bar{A} \bar{x}(t) + \bar{B} u(t) + \bar{D} f(t) + \bar{L} w(t), \\ y(t) = \bar{C} \bar{x}(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $\bar{x} \in R^n$ – вектор переменных состояния, \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , \bar{D} и \bar{L} – матрицы с неизвестными коэффициентами, $y(t)$ – измеряемая выходная переменная, $u(t)$ – сигнал управления, $f(t)$ – ограниченное возмущающее воздействие, нелинейная функция $w(t) = \varphi(y(t - \tau))$ такая, что $|\varphi(y(t - \tau))| \leq C_0 |y(t - \tau)|$ для всех $y(t - \tau)$, где $\tau > 0$ – неизвестное постоянное запаздывание, число C_0 – неизвестно, $y(\vartheta) = \phi(\vartheta)$ для $\forall \vartheta \in [-\tau, 0]$.

Задача 1. Рассматривается **нелинейная** система (1) с известной относительной степенью ρ и запаздыванием по состоянию τ . Требуется синтезировать такой закон управления, который бы обеспечивал экспоненциальную устойчивость замкнутой системы при $f(t) = 0$ и сходимость выходной переменной $y(t)$ в замкнутой системе в некоторую малую область ε при ограниченном возмущающем воздействии $f(t)$.

Задача 2. Рассматривается линейная система (1) (т.е. $\varphi = 0$) с **неизвестной** относительной степенью ρ . Требуется синтезировать закон управления, обеспечивающий асимптотическую устойчивость замкнутой системы при $f(t) = 0$ и сходимость выходной переменной $y(t)$ в замкнутой системе в некоторую малую область ε при ограниченном возмущающем воздействии $f(t)$.

Для решения *Задачи 1* представим модель (1) в форме вход-выход:

$$y(t) = \frac{b(p)}{a(p)} u(t) + \frac{l(p)}{a(p)} w(t) + \frac{d(p)}{a(p)} f(t), \quad (2)$$

где $p = d/dt$ – оператор дифференцирования, $b(p) = b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0$,
 $d(p) = d_r p^r + d_{r-1} p^{r-1} + \dots + d_1 p + d_0$, $l(p) = l_q p^q + l_{q-1} p^{q-1} + \dots + l_1 p + l_0$,
 $a(p) = p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0$ – полиномы с неизвестными параметрами;
 $r, q \leq n-1$, коэффициент $b_m > 0$.

Сначала рассмотрим случай, когда передаточная функция $\frac{b(p)}{a(p)}$ имеет относительную степень $\rho = 1$, полином $b(p)$ – гурвицев, а также $w(t) = 0$ и $f(t) = 0$. Выберем управление в следующем виде:

$$u(t) = -ky(t) + v(t), \quad (3)$$

где $v(t)$ – дополнительный вход и параметр $k > 0$.

Лемма 1. Существует некоторое положительное число k_0 такое, что для любого $k \geq k_0$ система $y(t) = H(p)v(t)$ обладает строго вещественно положительной передаточной функцией:

$$H(p) = \frac{b(p)}{a(p) + kb(p)}. \quad (4)$$

Базируясь на сформулированной лемме, а также методе последовательного компенсатора, выберем закон управления следующего вида:

$$u(t) = -(k + \gamma)\alpha(p)\xi_1(t), \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \sigma\xi_2, \\ \dot{\xi}_2 = \sigma\xi_3, \\ \dots \\ \dot{\xi}_{\rho-1} = \sigma(-k_1\xi_1 - k_2\xi_2 - \dots - k_{\rho-1}\xi_{\rho-1} + k_1y), \end{cases} \quad (6)$$

где $\sigma > k$, $k > 0$, $\gamma > 0$, полином $\alpha(p)$ гурвицев и имеет степень $\rho - 1$.

Тогда система (2) примет вид:

$$\begin{aligned} y(t) = & \frac{b(p)\alpha(p)}{a(p) + k\alpha(p)b(p)} [-\gamma y(t) + (k + \gamma)\varepsilon(t)] + \\ & + \frac{1}{a(p) + k\alpha(p)b(p)} [l(p)w(t) + d(p)f(t)], \end{aligned} \quad (7)$$

где передаточная функция $W(p) = \frac{b(p)\alpha(p)}{a(p) + k\alpha(p)b(p)}$ является строго вещественно положительной, полином $\alpha(p)$ – гурвицев и имеет степень $\rho - 1$, коэффициент $\gamma > 0$, $\varepsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t)$, $\hat{y}(t) = \xi_1$.

Представим модель (7) в форме вход-состояние-выход:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B(-\gamma y(t) + (k + \gamma)\varepsilon(t)) + Lw(t) + Df(t), \quad (8)$$

$$y(t) = C^T x(t), \quad (9)$$

и сформулируем следующее утверждение.

Утверждение 1. Пусть относительная степень объекта управления $\rho = n - m \geq 1$ и неизвестная функция $w(t) = \phi(y(t - \tau))$ такая, что $|\phi(y(t - \tau))| \leq C_0 |y(t - \tau)|$ для всех $y(t - \tau)$, где $\tau > 0$ и $C_0 > 0$ – неизвестные, соответственно, постоянное запаздывание и константа, $y(\vartheta) = \phi(\vartheta)$ для $\forall \vartheta \in [-\tau, 0]$. Тогда существуют такие числа $k > 0$, $\gamma > 0$ и $\sigma > 0$, что замкнутая система (8), (9) является экспоненциально устойчивой.

Доказательство данного утверждения базируется на анализе функционала Ляпунова-Красовского вида:

$$V(t) = x^T(t)Px(t) + \eta^T(t)N\eta(t) + \gamma_0 \int_{t-\tau}^t e^{-t+\Theta} y^2(\Theta) d\Theta, \quad (10)$$

где

$$A^T P + PA = -R, \quad PB = C,$$

число $\gamma_0 > 0$, матрицы $P = P^T > 0$, $N = N^T > 0$, $R = R^T > 0$, векторы $\eta(t) = hy(t) - \xi(t)$ и $h = \text{col}\{1, 0, \dots, 0\}$ размерности $\rho - 1$.

После дифференцирования (10) и проведения ряда преобразований, получаем:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & -x^T(t)Q_1x(t) - \eta^T(t)Q_2\eta(t) + \left((\delta^{-1} + \gamma^{-1})C_0^2 - \gamma e^{-\tau} \right) y^2(t - \tau) - \\ & - \gamma_0 \int_{t-\tau}^t e^{-t+\Theta} y^2(\Theta) d\Theta + \gamma^{-1} (1 + \delta^{-1}) [f(t)]^2, \end{aligned} \quad (11)$$

где $[w(t)]^2 \leq C_0^2 y^2(t - \tau)$, $\gamma_0 \geq e^\tau C_0^2 (\gamma^{-1} + \delta^{-1})$, число $\delta > 0$ такое, что

$$-R + \delta I + (\delta k + 2\delta\gamma - \gamma)PBB^T P + \delta PLL^T P + \delta\gamma PDD^T P \leq -Q_1 < 0,$$

$$Q_1 = Q_1^T > 0, \quad Q_2 = Q_2^T > 0.$$

Из выражения (11) следует экспоненциальная устойчивость системы (5), (6).

Для закона управления (5), (6) может быть предложена адаптивная версия, заключающаяся в том, что необходимо увеличивать коэффициенты регулятора k , γ и σ до тех пор, пока выходная переменная $y(t)$ не попадет в некоторую малую желаемую область $\delta_0 > 0$, задаваемую разработчиком системы управления: $|y(t)| < \delta_0, \forall t \geq t_1 > 0$.

Такая концепция может быть реализована при использовании следующего алгоритма настройки:

$$\tilde{k}(t) = \int_{t_0}^t \lambda(\Theta) d\Theta, \quad (12)$$

где $\tilde{k} = k + \gamma$ и функция $\lambda(t) = \begin{cases} \lambda_0, & \text{для } |y(t)| > \delta_0, \\ 0, & \text{для } |y(t)| \leq \delta_0, \end{cases}$ где число $\lambda_0 > 0$.

Зададим параметр σ следующим образом:

$$\sigma = \zeta_0 \tilde{k}^2, \quad (13)$$

где число $\zeta_0 > 0$.

Для решения *Задачи 2* допустим, что относительная степень объекта управления ρ неизвестна, но известны ее границы: $\rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max}$. Модифицируем закон управления (5) следующим образом:

$$u(t) = -(k + \gamma)\alpha(p) \frac{(T_2 p + 1)^{\Delta\rho}}{(T_1 p + 1)^{\Delta\rho}} \xi_1(t), \quad (14)$$

где $\Delta\rho = \rho_{\max} - \rho_{\min}$, полином $\alpha(p)$ гурвицев и имеет степень ρ_{\min} , параметры $T_1 > 0, T_2 > 0$.

Сформулируем следующее утверждение.

Утверждение 2. Существуют числа $k > 0$, $\gamma > 0$, $\sigma > 0$ и малая величина T_1 , где $\sigma \gg \frac{1}{T_1} > k$, такие, что для замкнутой системы (1), (6), (14) при $f(t) = 0$ выполняется целевое условие $y(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

Доказательство данного утверждения проводится по аналогии с доказательством Утверждения 1 и приведено в тексте диссертации.

Для демонстрации работоспособности разработанного закона управления было проведено компьютерное моделирование, иллюстрирующее достижение заданной цели.

В третьей главе рассматривается задача управления движением мобильного робота вдоль неизвестной траектории. Производится апробация синтезированных во второй главе алгоритмов управления на реальных мобильных роботах. Рассматриваемая задача решается на примере следования мобильного робота вдоль неизвестного препятствия на заданном расстоянии r^* от него (см. рисунок 1). Для реализации этой задачи робот должен быть оснащен измерителем расстояния, например, ультразвуковым датчиком.

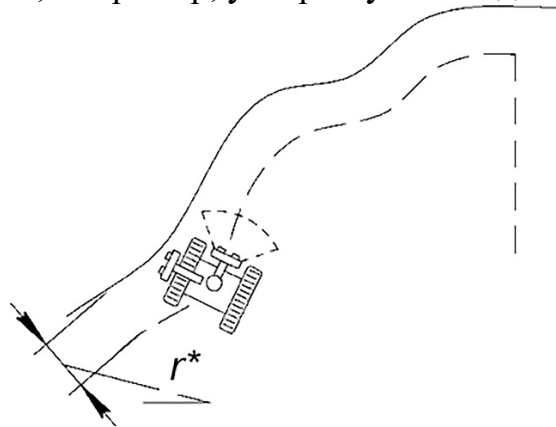


Рисунок 1 – Движение вдоль стены на заданном расстоянии

Движение по неизвестной траектории представляет собой решение задачи слежения, также справедливо именуемой сопровождением объекта. Для простоты рассмотрим частный случай задачи слежения, в котором гусеничный мобильный робот поддерживает заданное расстояние между объектом слежения и ультразвуковым датчиком (см. рисунок 2), где $h(t)$ – текущая координата робота, $g(t)$ – текущая координата объекта, r^* – желаемое расстояние до объекта и $r(t)$ – фактическое расстояние до объекта. На основании решения задачи слежения возможна реализация управления движением вдоль неизвестной траектории.

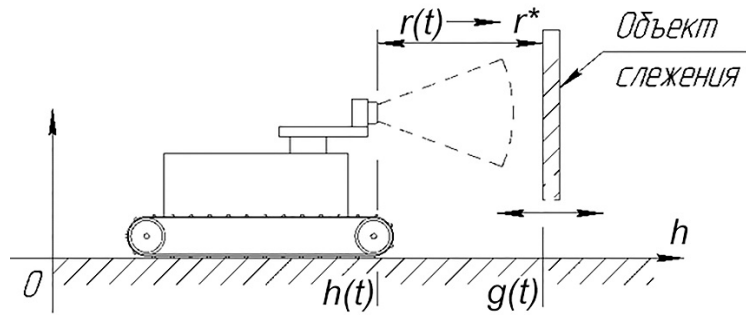


Рисунок 2 – Сопровождение объекта на заданном расстоянии

Рассмотрим упрощенную математическую модель объекта управления:

$$r(t) = \frac{k}{p(Tp+1)} [v(t) + M_c], \quad (15)$$

$$v(t) = \frac{\bar{b}_0}{\bar{a}(p)} u(t), \quad (16)$$

где предполагается, что постоянная времени T и коэффициент усиления k заданы не точно, M_c – момент сопротивления, уравнение (16) $v(t)$ представляет собой электромагнитную составляющую.

В предположении, что коэффициенты полинома $\bar{a}(p)$ и параметр \bar{b}_0 являются неизвестными, требуется обеспечить заданное расстояние робота до объекта слежения в соответствии с условием:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |r(t) - r^*| = \varepsilon. \quad (17)$$

В силу того, что ошибка слежения $e(t)$ за желаемым расстоянием r^* равна:

$$e(t) = r^* - r(t), \quad (18)$$

а текущее расстояние равно разности текущих координат объекта и робота:

$$r(t) = g(t) - h(t), \quad (19)$$

то доступная измерению ошибка слежения $e(t)$ представляет невязку текущей координаты робота $h(t)$:

$$e(t) = h^* - h(t) = r^* - r(t), \quad (20)$$

где переменная h^* – есть желаемая координата робота, соответствующая желаемому расстоянию r^* .

Требуется найти такое управление $u(t)$, что ошибка $e(t)$ со временем будет меньше некоторого малого числа ε .

После преобразований (18) – (20) получим структуру модели объекта управления, связывающую координаты объекта робота и объекта слежения с заданным желаемым расстоянием.

При экспериментальной апробации алгоритма для задачи слежения за объектом на мобильном роботе был установлен ультразвуковой дальномер, который измеряет расстояние до объекта. Алгоритм управления сравнивает полученное расстояние с заданным разработчиком системы желаемым

расстоянием, и формирует сигнал управления в соответствии с ошибкой слежения, подаваемый на сервоприводы. Закон управления имеет вид:

$$\begin{cases} u_1(t) = u(t), \\ u_2(t) = -u(t), \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} u(t) = \tilde{k}(p+1)\xi(t), \\ \dot{\xi}(t) = \sigma(e(t) - \xi(t)), \end{cases} \quad (22)$$

где $\tilde{k} = k + \gamma$. Знак «-» для $u_1(t)$ обусловлен конструктивной особенностью робототехнического макета, связанной с тем, что сервоприводы расположены симметрично.

Для решения задачи следования мобильного робота вдоль неизвестной траектории, алгоритм управления движением имеет вид:

$$\begin{cases} u_1(t) = u_v(t) + u(t), \\ u_2(t) = u_v(t) - u(t), \end{cases} \quad (23)$$

где u_1 и u_2 – сигналы управления, подаваемые на сервоприводы, функция $u_v(t)$ выбирается пропорционально скорости робота на прямом участке траектории, функция $u(t)$ вносит рассогласование между приводами и заставляет робота поворачивать вправо или влево. Для вычисления сигнала управления $u(t)$ используется алгоритм (22).

В четвертой главе решается задача синтеза системы дистанционного управления мобильными роботами через глобальную сеть Интернет. Основой системы дистанционного управления (см. рисунок 3) является Сервер, к которому подключены через интерфейсы «последней мили» удаленные робототехнические объекты управления. На схеме в качестве таких интерфейсов представлены USB-модули спецификаций IEEE 802.15.1 Bluetooth и IEEE 802.15.4 ZigBee, к которым подключены два робота Lego Mindstorms NXT (Робот 1 и Робот 3) и два робота Parallax Voe-Bot (Робот 2 и Робот 4) соответственно. Сервер подключен по локальной сети Ethernet к маршрутизатору, имеющему доступ к каналу связи глобальной сети Интернет.

Обмен телеметрической информацией между конечными пользователями (Пользовательские ПК 1, 2, i , n) и техническими объектами (Роботы 1-4) выполняет серверное программное обеспечение, написанное на Node.js. Для минимизации временных задержек используется современная технология web-сокетов, позволяющая постоянно держать открытым соединение между пользователем и Сервером. Для взаимодействия технического объекта с Сервером, а, соответственно, и с пользователем, используется библиотека serialport для Node.js. Таким образом, работа реализуется через стандартный последовательный порт, что позволяет подключать к Серверу огромное количество различных технических объектов. При апробации рассмотренной архитектуры на мобильных роботах Lego Mindstorms NXT и Parallax Voe-Bot задержки по управлению находились в пределах 20–50 мс.

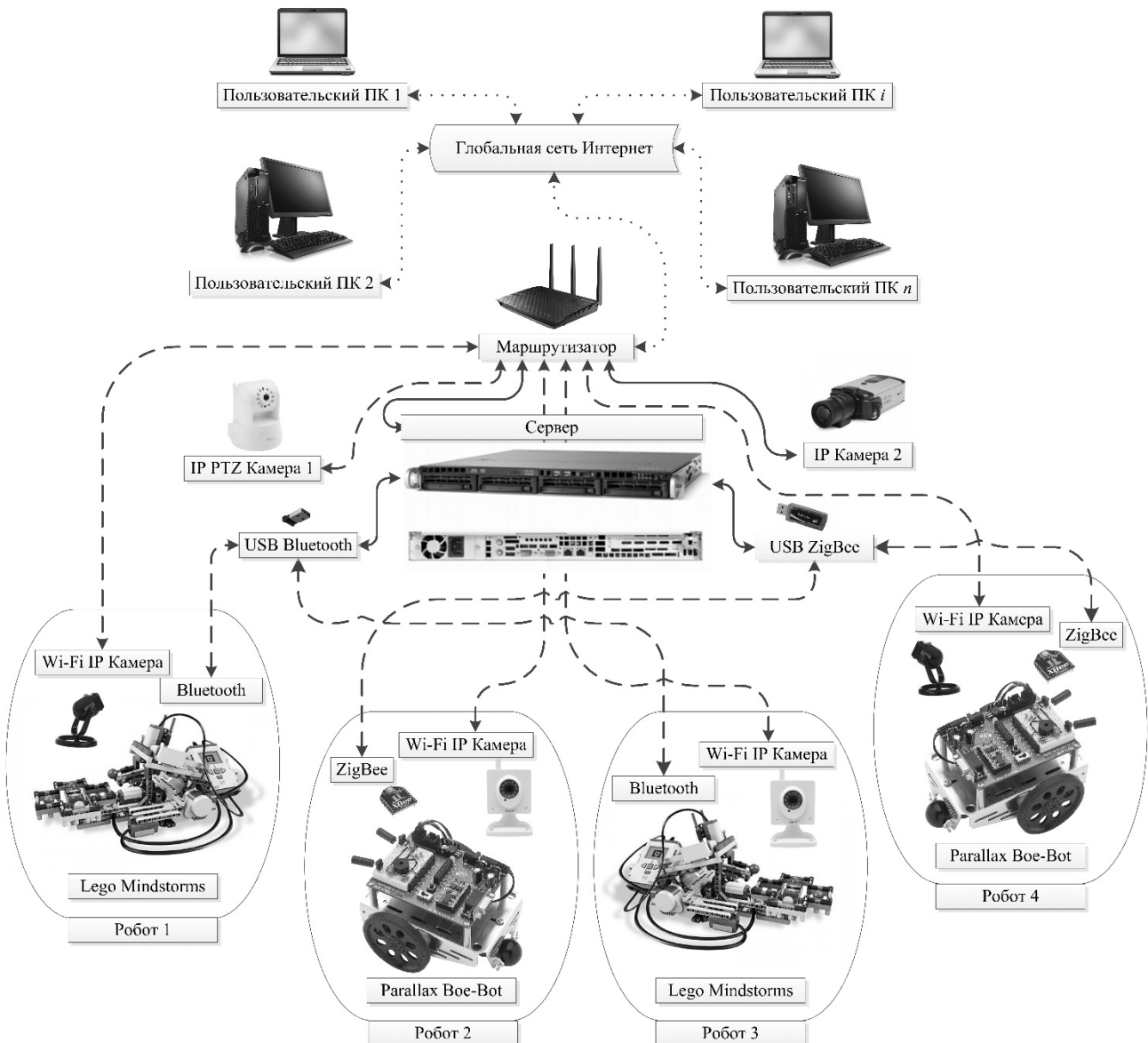


Рисунок 3 – Система дистанционного управления мобильными роботами через глобальную сеть Интернет

Для контроля положения мобильного робота в пространстве была разработана система технического зрения. Система технического зрения (см. рисунок 3) реализована через использование логически и электронно-независимых от объектов управления, но закрепленных на них механически мобильных Wi-Fi IP-видеокамер, подключенных к маршрутизатору по стандарту IEEE 802.11g. В зависимости от задачи может потребоваться организация видеовещания со стороны. В таком случае целесообразно использовать статичные IP-камеры (Камера 1) или IP PTZ-камеры (Камера 2).

Для вещания видеопотока через глобальную сеть Интернет как наиболее оптимальный был использован формат MJPEG. Для уменьшения нагрузки на локальную сеть, в которой работает мобильный робот, необходимо конечному пользователю ретранслировать видеопоток с Сервера, что было реализовано при помощи библиотеки Paparazzo.js для Node.js.

При апробации пяти IP-камер различных производителей при вещании в формате MJPEG по локальной сети при разрешении 320×240 пикселей задержки составили порядка 200 мс и 500 мс при вещании через глобальную сеть Интернет. В ходе проделанной работы были протестированы около 10 различных маршрутизаторов. После проведенного тестирования был сделан вывод, что тактовая частота процессора маршрутизатора должна составлять не менее 1 ГГц при использовании в одной системе более чем двух IP-видеокамер для предотвращения возникновения серьезных временных задержек.

Помимо технической составляющей системы дистанционного управления необходимо разработать алгоритм управления мобильным роботом, который бы адекватно работал в условиях запаздывания. В качестве такого алгоритма в мобильном роботе был использован рассмотренный в предыдущих главах закон управления вида (5), (6). На рисунке 4 изображена структура системы управления.

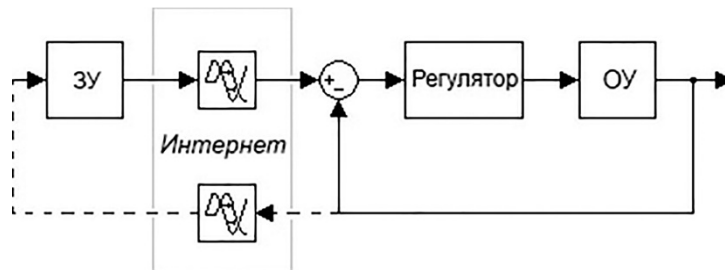


Рисунок 4 – Структура системы управления мобильным роботом

В качестве задающего устройства (ЗУ) при ручном управлении может выступать конечный пользователь. Цепь обратной связи замкнута через глобальную сеть Интернет, что вносит запаздывание в измеряемый сигнал. Сигнал, вырабатываемый задающим устройством (конечным пользователем), также передается в условиях канальных ограничений и обладает запаздыванием. Соответственно запаздывание в цепи обратной связи будет обусловлено запаздыванием видеоизображения (500 мс по данным эксперимента) и временем реакции пользователя на положение мобильного робота в пространстве. Время реакции взрослого человека составляет около 200 мс. Запаздывание в канале управления колеблется в зависимости от величины времени отклика Сервера. В проведенном в рамках диссертационной работы эксперименте время отклика сервера составляло 3-10 мс. Для более сложных условий было принято запаздывание равным 100 мс. Таким образом, запаздывание в контуре обратной связи составляет $\tau_2 = 700$ мс, а в контуре управления: $\tau_1 = 100$ мс. Представленные в диссертационной работе результаты математического моделирования и экспериментальных исследований, иллюстрируют работоспособность предлагаемой системы дистанционного управления мобильными роботами Lego Mindstorms NXT и Parallax Voe-Bot через глобальную сеть Интернет.

Заключение

В диссертационной работе решены следующие задачи:

1. Разработан метод адаптивного управления по выходу нелинейным параметрически и функционально неопределенным объектом с известной относительной степенью, обеспечивающий экспоненциальную устойчивость замкнутой системы. Разработан метод адаптивного управления по выходу линейным параметрически неопределенным объектом с неизвестной относительной степенью. Проведено численное моделирование синтезированных методов управления. Разработанный закон управления обладает низкой размерностью и простотой программной реализации в технических системах.

2. Синтезирован алгоритм управления движением мобильного робота вдоль неизвестной траекторий. Предложенный алгоритм не требует знания параметров объекта управления. Проведена апробация алгоритма управления на реальных мобильных роботах.

3. Разработана универсальная система дистанционного управления робототехническими объектами через глобальную сеть Интернет, внедрение которой требует лишь возможности подключения технического объекта к серверу через последовательный порт. Система апробирована на мобильных роботах на базе Lego Mindstorms NXT и Parallax Voe-Bot.

Публикации по теме диссертации

1. Шаветов, С.В. Управление по выходу линейным параметрически неопределенным объектом в условиях возмущающих воздействий и неучтенной динамики [Текст] / А.А. Бобцов, С.В. Шаветов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – №1 (71). – С. 33-39. – 0,4/0,2 п.л.

2. Шаветов, С.В. Технология Lego Mindstorms NXT в обучении студентов основам адаптивного управления [Текст] / А.А. Бобцов, С.А. Колюбин, С.В. Шаветов [и др.] // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – №1 (71). – С. 103-108. – 0,4/0,13 п.л.

3. Shavetov S. Using of LEGO Mindstorms NXT Technology for Teaching of Basics of Adaptive Control Theory [Текст] / A. Bobtsov, A. Pyrkin, S. Shavetov [и др.] // Proceedings of the 18th IFAC World Congress. – 2011. – P. 9818-9823. – 0,4/0,13 п.л.

4. Shavetov S. Output control approach “Consecutive Compensator” providing exponential and L-infinity-stability for nonlinear systems with delay and disturbance [Текст] / A. Pyrkin, A. Bobtsov, S. Shavetov [и др.] // Proceedings of the IEEE International conference on control applications. – 2011. – P. 1499-1504. – 0,4/0,13 п.л.

5. Shavetov S. Lego Mindstorms NXT for Students' Research Projects in Control Field [Текст] / A. Bobtsov, A. Pyrkin, S. Shavetov [и др.] // Proceedings of the 9th

IFAC Symposium Advances in Control Education. – 2012. – P. 102-106. – 0,3/0,06 п.л.

6. Shavetov S. Simple Output Stabilization Approach for Robotic Systems [Текст] / A. Bobtsov, A. Pyrkin, S. Shavetov [и др.] // Proceedings of the 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control. – 2013. – P. 1873-1878. – 0,4/0,07 п.л.

7. Шаветов, С.В. Архитектура системы удаленного управления робототехническими объектами [Текст] / С.В. Шаветов, А.А. Ведяков, А.А. Пыркин // Научно-технический вестник ИТМО. – 2014. – №2 (90). – С. 161-163. – 0,2/0,15 п.л.

8. Шаветов, С.В. Система технического зрения в архитектуре системы удаленного управления [Текст] / С.В. Шаветов, А.А. Ведяков, А.А. Бобцов // Научно-технический вестник ИТМО. – 2014. – №2 (90). – С. 164-166. – 0,2/0,15 п.л.

9. Шаветов, С.В. Подвижная балансирующая научно-исследовательская платформа [Текст] / С.В. Шаветов, Ю.А. Капитанюк // Навигация и управление движением. Материалы XIV конференции молодых ученых. – 2012. – С. 363-369. – 0,4/0,25 п.л.