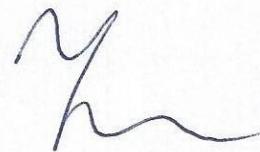


На правах рукописи



Фаронов Максим Викторович

**Компенсатор последовательного типа в задачах управления  
техническими системами в условиях возмущений, запаздывания и  
неучтенной динамики**

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

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

Санкт-Петербург – 2015

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

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
Фуртат Игорь Борисович

Официальные оппоненты: Соколов Виктор Федорович,  
доктор физико-математических наук,  
профессор,  
Коми научный центр УрО РАН,  
Отдел математики, ведущий научный  
сотрудник

Путов Антон Викторович,  
кандидат технических наук,  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),  
кафедра Систем автоматического  
управления, доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное  
автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Санкт-  
Петербургский Политехнический  
университет Петра Великого»

Защита состоится «28» мая 2015 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. 331.

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 [fpro.ifmo.ru](http://pro.ifmo.ru).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета,



Дударенко Наталия Александровна

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.** Проблема управления объектами в условиях параметрической неопределенности и внешних возмущений при измерении части вектора состояния – одна из классических задач современной теории управления. Это связано с тем, что зачастую на практике не удается измерить некоторые сигналы в объекте управления из-за отсутствия измерительных устройств или в силу особенностей самого процесса. К тому же параметры объекта управления могут быть неизвестны и изменяться в процессе работы.

Основные результаты в данной области были получены следующими отечественными и зарубежными учеными: Б.Р. Андриевский, А.М. Аннасвами, Р. Битмид, Ю.А. Борцов, В.Н. Буков, А.А. Бобцов, В.А. Брусин, С.Д. Земляков, П. Иоанноу, С.А. Кабанов, П. Кокотович, В.Н. Козлов, А.А. Колесников, М. Кристич, Г.А. Леонов, Р. Мариино, Л. Миркин, И.В. Мирошник, Р.В. Монополи, С. Морз, К. Нарендра, В.О. Никифоров, Б.Н. Петров, Б.Т. Поляк, Н.Д. Поляхов, В.В. Путов, Е.Н. Розенвассер, В.Ю. Рутковский, В.Ф. Соколов, П. Томей, В.Н. Фомин, А.Л. Фрадков, Х.К. Халил, В.Л. Харитонов, А.М. Цыкунов, Я.З. Цыпкин, П.В. Щербаков, В.А. Якубович и другие.

Однако, несмотря на большое количество результатов в этой области, по-прежнему актуальной задачей остается поиск простых алгоритмов управления с невысоким динамическим порядком. Решение данной задачи особенно актуально при рассмотрении объектов управления, модели которых содержат структурную неопределенность (неучтенную динамику), запаздывание, некоторые типы нелинейностей. Задача существенно усложняется, если рассматривается группа взаимосвязанных объектов. Примерами прикладных задач могут служить управление в робототехнических системах, авиации, химической, нефтяной, газовой и легкой промышленности, металлургии и т.п., то есть практика в изобилии доставляет задачи управления такими объектами.

Таким образом, актуальными являются исследования, связанные с разработкой новых алгоритмов адаптивного и робастного управления с невысоким динамическим порядком для одноканальных и многоканальных объектов, модели которых содержат неучтенную динамику, запаздывание, неизвестные параметры, внешние возмущения и нелинейности.

**Цель работы.** Целью диссертационной работы является синтез алгоритмов управления техническими объектами, математическое описание которых представлено в виде нелинейной одноканальной или многоканальной модели с запаздыванием по состоянию и неучтенной динамикой, в условиях действия возмущений.

**В процессе достижения поставленной цели решены следующие задачи:**

1. На базе компенсатора последовательного типа разработан алгоритм управления, обеспечивающий экспоненциальную устойчивость при управлении минимально-фазовыми объектами с запаздыванием по состоянию, с секторно ограниченной нелинейностью и неучтенной динамикой при известной относительной степени в условиях параметрической неопределенности.
2. Полученный алгоритм управления расширен на случай действия внешних ограниченных возмущений на объект управления.
3. Алгоритм управления обобщен для случая неизвестной относительной степени модели объекта управления.
4. Синтезирован компенсатор последовательного типа для управления минимально-фазовыми многоканальными системами управления с запаздыванием по состоянию с секторно ограниченной нелинейностью и неучтенной динамикой при известной относительной степени в условиях параметрической неопределенности.
5. Разработан алгоритм управления мобильным роботом «Robotino».

**Научная новизна.** В работе проанализирована работоспособность предложенных алгоритмов для управления параметрически и структурно неопределенными нелинейными одноканальными и многоканальными объектами управления с запаздыванием по состоянию. Доказана экспоненциальная устойчивость замкнутой системы при отсутствии внешнего возмущения и ограниченность всех траекторий системы при его наличии. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие полученные результаты.

**Теоретическая значимость работы.** Полученные в работе результаты позволяют расширить базу методов управления параметрически и структурно неопределенными линейными и нелинейными одноканальными и многоканальными объектами управления с запаздыванием по состоянию в условиях действия ограниченных по амплитуде неизвестных гладких возмущений.

**Практическая значимость работы.** Полученные в работе результаты могут быть использованы для программно-алгоритмического решения задач управления параметрически и структурно неопределенными нелинейными одноканальными и многоканальными объектами с запаздыванием, на которые действуют возмущения. В частности, в работе продемонстрировано решение задачи управления мобильным роботом на базе полученных теоретических результатов.

**Методы исследований.** При получении теоретических результатов использовались современные методы адаптивного и робастного управления, прямой метод Ляпунова, метод функционалов Ляпунова-Красовского, преобразования Лапласа, методы решений и анализа обыкновенных дифференциальных уравнений, дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом, методы алгебры многочленов и теории матриц.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Компенсатор последовательного типа, обеспечивающий экспоненциальную устойчивость минимально-фазовых объектов управления с запаздыванием по состоянию, секторно ограниченной нелинейностью и неучтенной динамикой при известной относительной степени в условиях параметрической неопределенности.

2. Алгоритм управления для случая действия на объект внешнего ограниченного возмущения.

3. Модифицированный алгоритм управления для случая неизвестной относительной степени модели объекта.

4. Компенсатор последовательного типа для управления многоканальными системами.

5. Алгоритм управления мобильным роботом «Robotino».

**Степень достоверности.** Достоверность результатов обеспечивается строгостью постановок задач и доказательств утверждений, корректным использованием математического аппарата, подтверждением теоретических результатов моделированием с помощью пакета прикладных программ MATLAB, а также результатами эксперимента на реальном оборудовании.

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

1. 13th International Student Olympiad on Automatic Control BOAC. Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет. 26.05.2010 - 28.05.2010.

2. XXXIX Международная научно-практическая конференция «Неделя науки СПбГПУ». Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет. 06.12.2010 - 11.12.2010.

3. XIII Конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». ЦНИИ "Электроприбор". 15.03.2011 - 18.03.2011.

4. The 19th Mediterranean Conference on Control and Automation. Corfu, Greece. 20.06.2011 – 23.06.2011.

5. The 18th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC). Milano, Italy. 28.08.2011 – 02.09.2011.

6. 14th International Student Olympiad on Automatic Control BOAC. Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики. 21.09.2011 - 23.09.2011.

7. 2011 IEEE International Conference on Control Applications. Denver, USA. 26.09.2011 – 30.09.2011.

8. XIV Конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». ЦНИИ "Электроприбор". 13.03.2012 - 16.03.2012.

9. 2012 IEEE International Conference on Control Applications. Dubrovnik, Croatia. 03.10. 2012 – 05.10.2012.

10. XV Конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». ЦНИИ "Электроприбор". 12.03.2013 - 15.03.2013.

11. II Всероссийский конгресс молодых ученых. НИУ ИТМО. 09.04.2013 – 12.04.2013.

12. ICNПAA 2014 Congress. Narvik University, Norway. 15.07.2014 – 18.07.2014.

13. 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). Санкт-Петербург, 06.10.2014 – 08.10.2014.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 14 печатных работ, из которых 3 публикации входят в издания из перечня ВАК, 5 – в базу данных Scopus, 11 статей опубликовано по материалам конференций.

**Личный вклад автора.** Автором диссертационной работы были проведены теоретические и экспериментальные исследования в задачах синтеза и апробации на мобильном роботе алгоритмов управления для одноканальных или многоканальных объектов, модели которых содержат неизвестные параметры, возмущения, запаздывание по состоянию и неучтенную динамику.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 134 страницах, содержит 50 рисунков и 142 библиографических наименования.

## **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы и показана необходимость изучения задач управления параметрически и структурно неопределенными объектами. Сформулированы цели и задачи исследования и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен обзор отечественной и зарубежной литературы по методам и алгоритмам адаптивного и робастного управления. Уделяется

внимание классическим результатам – регуляторам с расширенной ошибкой, алгоритмам адаптации высокого порядка и регуляторам, получаемым на основе итеративных процедур синтеза. Рассмотрены публикации, посвященные управлению линейными и нелинейными системами с запаздыванием. Также показано решение проблемы синтеза алгоритмов управления для систем с неучтенной динамикой различными авторами. Отдельно рассмотрен вопрос об управлении сетями взаимосвязанных объектов, где важную роль занимают задачи стабилизации и синхронизации подсистем, входящих в состав многоканального объекта управления. Дополнительно показан простейший случай использования алгоритма управления «последовательный компенсатор», предложенный профессором А.А. Бобцовым, для стабилизации стационарного минимально-фазового линейного объекта с известной относительной степенью.

**Во второй главе** ставится задача применения алгоритма управления «последовательный компенсатор» для управления одноканальными нелинейными нестационарными объектами управления с запаздыванием по состоянию и неучтенной динамикой вида

$$a(p)y(t) = b(p)v(t) + g(p,t)\varphi(y(t-h)), \quad (1)$$

$$d(p)v(t) = c(p)u(t), \quad (2)$$

где  $p = d/dt$  – оператор дифференцирования;  $b(p) = b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0$ ,  $a(p) = p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0$ ,  $g(p,t) = g_s(t) p^s + \dots + g_1(t) p + g_0(t)$ ,  $e(p) = e_k p^k + \dots + e_1 p + e_0$ ,  $d(p) = d_r p^r + d_{r-1} p^{r-1} + \dots + d_1 p + d_0$ ,  $c(p) = d(0)$  – полиномы с неизвестными коэффициентами, причем данные коэффициенты принадлежат известному ограниченному множеству  $\Xi$ . Выполняются также следующие допущения:

**Допущение 1.** Выходная переменная  $y = y(t)$  измеряется, но ее производные не доступны измерению.

**Допущение 2.** Объект минимально-фазовый, то есть полином  $b(s)$  гурвицев и коэффициент  $b_m > 0$ ;  $s$  – комплексная переменная.

**Допущение 3.** Относительная степень передаточной функции линейной части  $\rho = n - m$  известна и  $\rho \geq 1$ .

**Допущение 4.** Гладкая нелинейная функция  $\omega(t) = \varphi(y(t-h))$  удовлетворяет условию секторного ограничения вида

$$|\omega(t)| = |\varphi(y(t-h))| \leq C |y(t-h)|, \quad (3)$$

где  $\infty > h > 0$  – неизвестное запаздывание, число  $C > 0$  неизвестно.

Используется закон управления вида

$$u(t) = -\tilde{k}\alpha(p)\xi_1(t), \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1(t) = \sigma\xi_2(t), \\ \dot{\xi}_2(t) = \sigma\xi_3(t), \\ \dots \\ \dot{\xi}_{\rho-1}(t) = \sigma(-k_1\xi_1(t) - \dots - k_{\rho-1}\xi_{\rho-1}(t) + k_1y(t)), \end{cases} \quad (5)$$

$$\tilde{k} = k + \gamma, \quad (6)$$

где число  $k > 0$  и полином  $\alpha(s)$  степени  $\rho - 1$  выбираются так, чтобы передаточная функция  $H(s) = \frac{\alpha(s)b(s)}{a(s) + k\alpha(s)b(s)}$  была строго положительно вещественной, положительный параметр  $\gamma$  служит для компенсации нелинейности  $\varphi(y(t-h))$ ,  $\sigma > \tilde{k}$ , коэффициенты  $k_i$  рассчитываются из требований асимптотической устойчивости системы (5) при  $y(t) = 0$ .

После некоторых преобразований можно представить модель объекта управления в следующем виде:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + b\left(\tilde{k}\varepsilon_1(t) - \gamma y(t)\right) + \sum_{i=1}^n \chi_i \theta_i(t) \varphi(y(t-h)), \quad (7)$$

$$y(t) = c^T x(t), \quad (8)$$

где  $x \in R^n$  – вектор переменных состояния модели (7),  $A$ ,  $b$ ,  $\chi_i$  и  $c$  – матрицы и векторы соответствующих размерностей,  $\theta_i(t)$  – векторы нестационарных параметров,  $\varepsilon_1(t) = y(t) - \hat{y}(t)$  и  $d(p)\hat{y}(t) = c(p)\xi_1(t)$ . Перепишем модель, связывающую  $\hat{y}(t)$  с  $\xi_1(t)$ , и систему (5) в векторно-матричной форме:

$$\dot{\xi}(t) = \sigma(\Gamma \xi(t) + dk_1 y(t)), \quad \xi_1(t) = \bar{h}^T \xi(t), \quad (9)$$

$$\mu \dot{z}(t) = Fz(t) + q\xi_1(t), \quad \hat{y}(t) = l^T z(t), \quad (10)$$

где  $\xi \in R^{\rho-1}$  и  $z \in R^r$  – векторы переменных состояния моделей (9) и (10)

соответственно, матрица  $\Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -k_1 & -k_2 & -k_3 & \dots & -k_{\rho-1} \end{bmatrix}$  – гурвицева в силу

расчета коэффициентов  $k_i$  системы (5),  $d = [0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 1]^T$ ,  $\bar{h} = [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]^T$ ;  $F$ ,  $q$  и  $l$  – матрицы перехода от модели вход-выход  $d(p)\hat{y}(t) = c(p)\xi_1(t)$  к модели вход-состояние-выход, причем  $-Fl = q$ .

Вводятся векторы отклонений и их производные:

$$\eta_1(t) = ly(t) - z(t), \quad (11)$$

$$\eta_2(t) = \bar{h}y(t) - \xi(t), \quad (12)$$

$$\dot{\eta}_1(t) = l\dot{y}(t) + \mu^{-1}F\eta_1(t) + \mu^{-1}q\varepsilon_2(t), \quad (13)$$

$$\varepsilon_1(t) = y(t) - \hat{y}(t) = l^T\eta_1(t), \quad (14)$$

$$\dot{\eta}_2(t) = h\dot{y}(t) + \sigma\Gamma\eta_2(t), \quad (15)$$

$$\varepsilon_2(t) = y(t) - \xi_1(t) = \bar{h}^T\eta_2(t). \quad (16)$$

Положительно определенные матрицы  $P = P^T$ ,  $R = R^T$  и  $N = N^T$  удовлетворяют следующим матричным уравнениям:

$$A^TP + PA = -Q_1, \quad Pb = c, \quad F^TR + RF = -Q_2, \quad \Gamma^TN + N\Gamma = -Q_3, \quad (17)$$

где  $Q_1 = Q_1^T$ ,  $Q_2 = Q_2^T$  и  $Q_3 = Q_3^T$  – положительно определенные матрицы.

**Утверждение 2.1.** Пусть выполнены допущения 1-4, и для стабилизации системы (1), (2) используется закон управления (4)-(6), число  $k$  выбирается

таким образом, чтобы передаточная функция  $H(s) = \frac{\alpha(s)b(s)}{a(s) + k\alpha(s)b(s)}$  была

строго положительно вещественной. Тогда для любых чисел  $0 < \mu < \infty$ ,  $0 < \gamma < \infty$ ,  $0 < \sigma < \infty$  и  $0 < \delta < 0,5$ , удовлетворяющих условиям:

$$-\sigma Q_3 + \mu^{-2}\bar{h}\bar{h}^T + \delta^{-1}N\bar{h}\bar{h}^TN + \delta^{-1}\gamma^2N\bar{h}c^Tbb^Tc\bar{h}^TN + C^2\gamma N\bar{h}c^T\bar{\chi}_i^T\bar{\chi}_i c\bar{h}^TN + 2\gamma N\bar{h}c^Tbb^Tc\bar{h}^TN \leq -Q < 0, \quad (18)$$

$$-Q_1 + C^2\delta P\bar{\chi}_i^T\bar{\chi}_i P + \delta Pbb^TP + 2\delta A^Tc^TcA \leq -Q < 0, \quad (19)$$

$$\gamma \geq e^h(\gamma^{-1} + 2\delta^{-1}) \quad (20)$$

$$-\mu^{-1}Q_2 + \delta^{-1}\gamma^2ll^T + Rqq^TR + \delta^{-1}Rll^TR + 3\gamma Rlc^Tbb^Tcl^TR + (\gamma + \delta)ll^T + \delta C^2Rlc^T\bar{\chi}_i^T\bar{\chi}_i cl^TR \leq -Q < 0, \quad (21)$$

где  $\|\bar{\chi}_i\| \geq \left\| \sum_{i=1}^n \chi_i \theta_i(t) \right\|$ , выполнено целевое условие, то есть система (1)-(6)

экспоненциально устойчива в смысле нормы:

$$N(t) = \left( \|x(t)\|^2 + \|\eta_1(t)\|^2 + \|\eta_2(t)\|^2 + \int_{t-h}^t e^{-t+\vartheta} y^2(\vartheta) d\vartheta \right)^{1/2}. \quad (22)$$

Рассмотрим объект управления, на который действует возмущение  $f(t)$ :

$$a(p)y(t) = b(p)v(t) + e(p)f(t) + g(p,t)\varphi(y(t-h)), \quad (23)$$

$$d(p)v(t) = c(p)u(t) \quad (24)$$

где  $e(p) = e_\kappa p^\kappa + \dots + e_1 p + e_0$  – полином с неизвестными коэффициентами.

Остальные параметры аналогичны описанным для объекта (1), (2).

**Допущение 5.** Возмущение  $f(t)$  – гладкая ограниченная по амплитуде функция.

После некоторых преобразований можно представить модель объекта управления (23), (24) в следующем виде:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + b(\tilde{k}\varepsilon_1(t) - \gamma y(t)) + \beta f(t) + \sum_{i=1}^n \chi_i \theta_i(t) \varphi(y(t-h)), \quad (25)$$

$$y(t) = c^T x(t), \quad (26)$$

где  $\beta \in R^n$  – матрица входов по возмущению. Остальные параметры аналогичны описанным для объекта (7), (8).

В этом случае показывается, что все траектории замкнутой системы ограничены мажорирующей экспонентой и могут быть сведены в сколь угодно малую окрестность положения равновесия за счет увеличения коэффициентов регулятора. Это отражает следующее утверждение.

**Утверждение 2.2.** Пусть для стабилизации системы (23), (24) используется закон управления (4)-(6), система удовлетворяет допущениям 1-5, число  $k$  выбирается таким образом, чтобы передаточная функция

$H(s) = \frac{\alpha(s)b(s)}{a(s) + k\alpha(s)b(s)}$  была строго положительно вещественной. Тогда для

любых чисел  $0 < \mu < \infty$ ,  $0 < \gamma < \infty$ ,  $0 < \sigma < \infty$  и  $0 < \delta < 0.5$ , удовлетворяющих условиям:

$$-\sigma Q_3 + \mu^{-2} \bar{h} \bar{h}^T + \delta^{-1} N \bar{h} \bar{h}^T N + \delta^{-1} \gamma^2 N \bar{h} c^T b b^T c \bar{h}^T N + C^2 \gamma N \bar{h} c^T \bar{\chi}_i^T \bar{\chi}_i c \bar{h}^T N + \gamma N \beta^T c \bar{h} \bar{h}^T c^T \beta N + 2\gamma N \bar{h} c^T b b^T c \bar{h}^T N \leq -Q < 0, \quad (27)$$

$$-Q_1 + C^2 \delta P \bar{\chi}_i^T \bar{\chi}_i P + \delta P b b^T P + \gamma \delta P \beta \beta^T P + 2\delta A c^T c A^T \leq -Q < 0, \quad (28)$$

$$\gamma \geq e^h (\gamma^{-1} + 2\delta^{-1}) \quad (29)$$

$$-\mu^{-1} Q_2 + \delta^{-1} \gamma^2 l l^T + R q q^T R + \delta^{-1} R l l^T R + 3\gamma R l c^T b b^T c l^T R + (\gamma + \delta) l l^T + \gamma R \beta^T c l l^T c^T \beta R + \delta C^2 R l c^T \bar{\chi}_i^T \bar{\chi}_i c l^T R \leq -Q < 0, \quad (30)$$

где  $\|\bar{\chi}_i\| \geq \left\| \sum_{i=1}^n \chi_i \theta_i(t) \right\|$ , выполнено целевое условие, то есть все траектории

системы ограничены и могут быть сведены в любую сколь угодно малую окрестность положения равновесия. Более того, траектории системы ограничены некоторой экспонентой, то есть существуют числа  $\varpi_1, \varpi_2, \tau_1$ , такие, что:

$$N(t) = \left( \|x(t)\|^2 + \|\eta_1(t)\|^2 + \|\eta_2(t)\|^2 + \int_{t-h}^t e^{-t+\vartheta} y^2(\vartheta) d\vartheta \right)^{1/2} \leq \leq \varpi_1 e^{-\varpi_2 t} N(0) + \tau_1 \sup_{s \in (0,t)} f(s). \quad (31)$$

Условия (18)-(21) и (27)-(30) не являются противоречивыми, так как для их достижения необходимо уменьшать  $\delta$  и увеличивать  $\tilde{k}$  и  $\sigma$ , причем  $\sigma > \tilde{k}$ . Поскольку параметры системы неизвестны, предлагается адаптивный алгоритм настройки параметров регулятора:

$$\tilde{k}(t) = \int_{t_0}^t \lambda(\tau) d\tau, \quad \lambda(t) = \begin{cases} \lambda_0, & |y(t)| > \delta_0 \\ 0, & |y(t)| \leq \delta_0, \end{cases} \quad (32)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \tilde{k}^2(t), \quad (33)$$

где  $\lambda_0 > 0$ ,  $\sigma_0 > 0$ ,  $\delta_0 > 0$  задаются разработчиком системы управления. В случае задачи слежения выходная переменная  $y(t)$  в выражениях (32) и (5) заменяется на ошибку слежения  $e(t)$ .

В указанных случаях устойчивость гарантируется при низкой постоянной времени неучтенной динамики  $\mu$ , такой, что выполняется неравенство (21) при отсутствии возмущения или (30) при его наличии. В более общем случае, когда известна только максимальная относительная степень объекта, можно ввести в закон управления дополнительный множитель:

$$u(t) = -\tilde{k} \alpha(p) \frac{1}{(Tp+1)^g} \xi_1(t), \quad (34)$$

где  $g = \rho_{\max} - 1$ ,  $T$  – адаптивно настраиваемый параметр, и регулятор имеет размерность  $g$ . Тогда замкнутая система будет иметь относительную степень  $\rho = 1$ , что позволяет применить вышеописанный подход для ее стабилизации.

Алгоритм настройки параметра  $\tilde{k}$  не изменяется, а алгоритм настройки параметров  $T^{-1}$  и  $\sigma$  выглядят следующим образом:

$$T^{-1}(t) = T_0 \tilde{k}^2(t), \quad T_0 > 0, \quad (35)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 [T_1^{-1}(t)]^{2g}, \quad \sigma_0 > 0. \quad (36)$$

Рассмотрена также задача слежения за гладким ограниченным задающим воздействием. Делается вывод, что ошибка слежения при использовании закона управления (4)-(6) также ограничена некоторой экспонентой, однако в общем случае даже при отсутствии возмущения слежение осуществляется с некоторой ошибкой, не превышающей заданное число  $\delta_0$ .

В третьей главе задача управления параметрически и структурно неопределенными нелинейными объектами с запаздыванием по состоянию в условиях действия внешних возмущений обобщается на многоканальные системы с перекрестными связями вида

$$a_i(p)y_i(t) = b_i(p)v_i(t) + e_i(p)f_i(t) + g_i(p)\varphi_i(y_i(t-h_i)) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^w \bar{c}_{ij}(p)y_j(t), \quad (37)$$

$$d_i(p)v_i(t) = c_i(p)u_i(t), \quad i = 1, \dots, w, \quad (38)$$

где  $w$  — количество подсистем,  $g_i(p) = g_{\zeta_i}p^\zeta + \dots + g_{l_i}p + g_{0i}$ ,  $\bar{c}_{ij}(p) = \bar{c}_{\psi_{ij}}p^\psi + \bar{c}_{\psi-1;ij}p^{\psi-1} + \dots + \bar{c}_{1ij}p + \bar{c}_{0ij}$  — полиномы с неизвестными коэффициентами, остальные параметры и допущения для каждой подсистемы аналогичны описанным для объекта управления (1), (2) и (23), (24) в главе 2.

Для каждой подсистемы выбирается закон управления, аналогичный (4)-(6)

$$u_i(t) = -\tilde{k}_i \alpha_i(p) \xi_{1i}(t), \quad (39)$$

$$\begin{cases} \dot{\xi}_{1i}(t) = \sigma_i \xi_{2i}(t), \\ \dot{\xi}_{2i}(t) = \sigma_i \xi_{3i}(t), \\ \dots \\ \dot{\xi}_{\rho_i-1;i}(t) = \sigma_i \left( -k_{1i} \xi_{1i}(t) - k_{2i} \xi_{2i}(t) - \dots - k_{\rho_i-1;i} \xi_{\rho_i-1;i}(t) + k_{1i} y_i(t) \right), \end{cases} \quad (40)$$

$$\tilde{k}_i = k_i + \gamma_i, \quad i = 1, \dots, w, \quad (41)$$

где числа  $k_i > 0$  и операторы  $\alpha_i(p)$  степени  $\rho_i - 1$  выбираются таким образом, чтобы передаточные функции  $H_i(s) = \frac{\alpha_i(s)b_i(s)}{a_i(s) + k_i \alpha_i(s)b_i(s)}$  были строго положительно вещественными, числа  $\sigma_i > \tilde{k}_i$ , а коэффициенты  $k_{ij}$  рассчитываются из требований устойчивости систем (40) при нулевых входах  $y_i(t)$ .

После некоторых преобразований можно представить модель объекта управления (37), (38) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) = & A_i x_i(t) + b_i \left( \tilde{k}_i \varepsilon_{ii}(t) - \gamma_i y_i(t) \right) + \beta_i f_i(t) \\ & + \chi_i \varphi_i(y_i(t-h_i)) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^w z_{ij} y_j(t), \end{aligned} \quad (42)$$

$$y_i(t) = c_i^T x_i(t), \quad i = 1, \dots, w, \quad (43)$$

где  $z_{ij} \in R^n$  — матрицы входов по перекрестным связям. Остальные параметры аналогичны описанным для объекта (7), (8) и (25), (26) в главе 2.

**Утверждение 3.1.** Пусть для каждой подсистемы выполняются допущения 1-5, для стабилизации системы (37), (38) используется закон управления (39)-(41), числа  $k_i$  выбирается таким образом, чтобы

передаточные функции  $H_i(s) = \frac{\alpha_i(s)b_i(s)}{a_i(s) + k_i\alpha_i(s)b_i(s)}$  были строго положительно вещественными. Тогда для любых чисел  $0 < \mu_i < \infty$ ,  $0 < \gamma_i < \infty$ ,  $0 < \sigma_i < \infty$ ,

$0 < \delta_{1i} < 0,5$  и  $0 < \delta_{2i} < 0,5$ ,  $i = 1, \dots, w$ , удовлетворяющих условиям:

$$\begin{aligned} & -Q_{1i} + \delta_{1i} P_i b_i b_i^T P_i + \gamma_i \delta_{2i} P_i \beta_i \beta_i^T P_i + \delta_{1i} C_i^2 P_i \bar{\chi}_i \bar{\chi}_i^T P_i + 2\delta_{1i} A_i^T c_i c_i^T A_i \\ & + 5(w-1) \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^w \gamma_j^{-1} P_i z_{ij} z_{ij}^T P_i \leq -Q_i < 0, \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} & -\mu_i^{-1} Q_{2i} + (\delta_{1i}^{-1} \tilde{k}_i^2 + 2\tilde{k}_i) l^T + \delta_{1i}^{-1} R_i l l^T R_i + (\tilde{k}_i + 5\gamma_i) R_i l c_i^T b_i b_i^T c_i l_i^T R_i \\ & + \gamma_i R_i l c_i^T \beta_i \beta_i^T c_i l_i^T R_i + \delta_{1i} C_i^2 R_i l c_i^T \bar{\chi}_i \bar{\chi}_i^T c_i l_i^T R_i + R_i q_i q_i^T R_i + 5(w-1) \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^w \gamma_j^{-1} R_i l c_i^T z_{ij} z_{ij}^T c_i l_i^T R_i \\ & \leq -Q_i < 0, \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} & -\sigma_i Q_{3i} + \mu_i^{-2} \bar{h}_i \bar{h}_i^T + \delta_{1i}^{-1} N_i \bar{h}_i \bar{h}_i^T N_i + (\tilde{k}_i + 5\gamma_i) N_i \bar{h}_i c_i^T b_i b_i^T c_i \bar{h}_i^T N_i \\ & + \gamma_i N_i \bar{h}_i c_i^T \beta_i \beta_i^T c_i \bar{h}_i^T N_i + \delta_{1i} C_i^2 N_i \bar{h}_i c_i^T \bar{\chi}_i \bar{\chi}_i^T c_i \bar{h}_i^T N_i + 5(w-1) \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^w \gamma_j^{-1} N_i \bar{h}_i c_i^T z_{ij} z_{ij}^T c_i l_i^T N_i \\ & \leq -Q_i < 0, \end{aligned} \quad (46)$$

$$\gamma_i \geq 3e^{h_i} \delta_{1i}, \quad i = 1, \dots, w, \quad (47)$$

выполнено целевое условие, то есть все траектории системы ограничены и могут быть сведены в любую сколь угодно малую заданную окрестность положения равновесия. Более того, траектории системы ограничены некоторой экспонентой, т.е. существуют числа  $\varpi_{1i}, \varpi_{2i}, \tau_{1i}$ , такие, что:

$$\begin{aligned} N_i(t) &= \left( \|x_i(t)\|^2 + \|\eta_{1i}(t)\|^2 + \|\eta_{2i}(t)\|^2 + \int_{t-h_i}^t e^{-t+\theta} y^2(\vartheta) d\vartheta \right)^{1/2} \leq \\ &\leq \varpi_{1i} e^{-\varpi_{2i} t} N_i(0) + \tau_{1i} \sup_{s \in (0,t)} f_i(s), \quad i = 1, \dots, w. \end{aligned} \quad (48)$$

Для каждой подсистемы рассмотрим следующие адаптивные алгоритмы настройки

$$\tilde{k}_i(t) = \int_{t_0}^t \lambda_i(\tau) d\tau, \quad \lambda_i(t) = \begin{cases} \lambda_{0i}, & |y(t)| > \delta_{0i} \\ 0, & |y(t)| \leq \delta_{0i}, \end{cases} \quad (49)$$

$$\sigma_i(t) = \sigma_{0i} \tilde{k}_i^2(t), \quad i = 1, \dots, w, \quad (50)$$

где  $\lambda_{0i} > 0$ ,  $\sigma_{0i} > 0$ ,  $\delta_{0i} > 0$  задаются разработчиком системы управления.

Если относительная степень подсистемы неизвестна, то в закон управления может вводиться дополнительный множитель:

$$u_i(t) = -\tilde{k}_i \alpha_i(p) \frac{1}{(T_i p + 1)^{\mathcal{G}_i}} \xi_{1i}(t), \quad i = 1, \dots, w, \quad (51)$$

где  $\mathcal{G}_i = \rho_{\max;i} - 1$ ,  $T_i$  – адаптивно настраиваемый параметр, и регулятор для  $i$ -й подсистемы имеет размерность  $\mathcal{G}_i$ .

**В четвертой главе** рассматривается практическое применение полученных результатов на примере задачи управления всенаправленным мобильным роботом «Robotino». Конструкция данного робота позволяет ему двигаться в любом направлении из любого начального положения за счет наличия роликонесущих колес. Колеса приводятся в движение тремя независимыми колесными приводами, расположенными под углом  $120^\circ$  друг относительно друга. Робот оснащен также различными датчиками и веб-камерой.

Ставится следующая задача: необходимо, чтобы робот с помощью установленной на нем веб-камеры находил направляющую линию, расположенную в вертикальной плоскости и состоящую из закрашенных кругов одинакового известного радиуса и заданного цвета, и далее ехал вдоль нее на заданном расстоянии, решая тем самым задачу слежения.

Угловые скорости каждого из трех двигателей связаны с линейными скоростями движения робота по осям  $X$  и  $Y$  в его локальной системе координат и угловой скоростью поворота корпуса вокруг своей оси следующими кинематическими соотношениями:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} = \frac{r}{n} \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -1 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{3R} & \frac{1}{3R} & \frac{1}{3R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \frac{n}{r} \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{3} & R \\ 0 & -\frac{2}{3} & R \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{3} & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix}, \quad (52)$$

где  $R$  – радиус платформы,  $r$  – радиус колеса,  $n$  – передаточное число редуктора.

Динамика же самих двигателей упрощенно описывается аperiodическим звеном первого порядка:

$$\omega_i(t) = \frac{K}{T_i p + 1} u_i(t), \quad i = 1, 2, 3, \quad (53)$$

где  $T$  – механическая постоянная времени,  $K$  – коэффициент передачи,  $u_i(t)$  – напряжение, подаваемое на двигатели.

Далее необходимо получить общую модель, которая бы связывала управляющий сигнал и текущее расстояние до задающей линии. В данной задаче скорость робота вдоль оси  $X$  его локальной системы координат  $v_x$  равна нулю, скорость робота вдоль оси  $Y$  постоянна ( $v_y = const$ ), а управление осуществляется за счет изменения угловой скорости поворота корпуса вокруг своей оси. Скорость изменения расстояния робота до задающей линии определяется проекцией вектора  $v_y$  на перпендикуляр к задающей линии (рисунок 1).

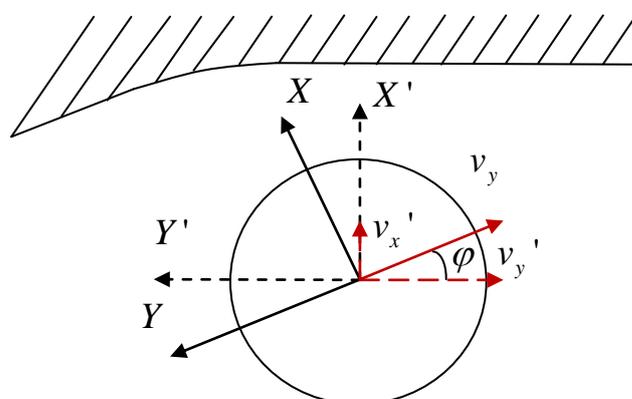


Рисунок 1 – Движение робота вдоль задающей линии ( $XY$  – локальная система координат робота,  $X'Y'$  – система координат, связанная с перпендикуляром к задающей линии)

Проекция определяется выражением

$$v_x'(t) = v_y \sin \varphi(t). \quad (54)$$

Угол  $\varphi(t)$  представляет собой разность между углом поворота корпуса робота относительно начального положения  $\varphi_r(t)$  и углом наклона касательной к задающей линии  $\varphi_w(t)$ , изгиб которой в данной модели является возмущением. Расстояние до задающей линии определяется через величину кругов на изображении веб-камеры путем определения их площади. С учетом неизменности угла обзора камеры, путем тригонометрических преобразований можно получить выражение, связывающее расстояние до задающей линии с радиусом круга на изображении:

$$r(t) = r_{нач} \frac{R_{нач}}{R(t)}, \quad (55)$$

где  $r_{нач}$  – некоторое известное начальное расстояние,  $R_{нач}$  – отображаемый радиус в начальном положении.

Таким образом, задающим воздействием будет являться заданное расстояние до линии, а выходной переменной – оценка текущего расстояния, определенная через веб-камеру в данный момент времени. Обозначим ее  $\hat{r}(t)$ , так как расстояние может определяться с некоторой погрешностью. В итоге модель объекта управления описывается следующими выражениями:

$$\dot{\varphi}_r(t) = \omega(t), \quad (56)$$

$$\dot{r}(t) = v_y \sin(\varphi_r(t) - \varphi_w(t)), \quad (57)$$

$$\hat{r}(t) = \frac{r_{нач} R_{нач} \sqrt{\pi}}{\sqrt{S(t)}}. \quad (58)$$

Если задающая линия задается в плоскости  $O\bar{X}\bar{Y}$  некоторой гладкой функцией  $f_{tr}(\bar{x}(t))$ , причем линия начинается в начале координат, и касательная к ней в начале координат совпадает с осью  $\bar{x}$ , то угол между осью  $\bar{x}$  и касательной к задающей линии в каждой ее точке определяется соотношением:

$$\varphi_w(\bar{x}(t)) = \text{arctg} \frac{df_{tr}(\bar{x}(t))}{d\bar{x}(t)}. \quad (59)$$

Скорость движения робота вдоль осей  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  можно выразить следующим образом:

$$\dot{\bar{x}}_r(t) = v_{\bar{x}_r}(t) = v_y \cos \varphi_r(t), \quad (60)$$

$$\dot{\bar{y}}_r(t) = v_{\bar{y}_r}(t) = v_y \sin \varphi_r(t). \quad (61)$$

Связь между известными координатами робота  $\bar{x}_r$ ,  $\bar{y}_r$  и координатой задающей линии  $\bar{x}_{tr}$  в каждый момент времени находится из уравнения:

$$\bar{y}_r(t) = - \frac{1}{\left. \frac{df_{tr}(\bar{x}(t))}{d\bar{x}(t)} \right|_{\bar{x}=\bar{x}_{tr}}} (\bar{x}_r(t) - \bar{x}_{tr}(t)) + f_{tr}(\bar{x}_{tr}(t)). \quad (62)$$

Таким образом, структурная схема замкнутой системы управления представлена на рисунке 2.

В качестве закона управления принимается рассмотренный ранее алгоритм управления «последовательный компенсатор» для относительной степени объекта управления  $\rho = 2$ , поскольку динамику двигателя будем считать неучтенной.

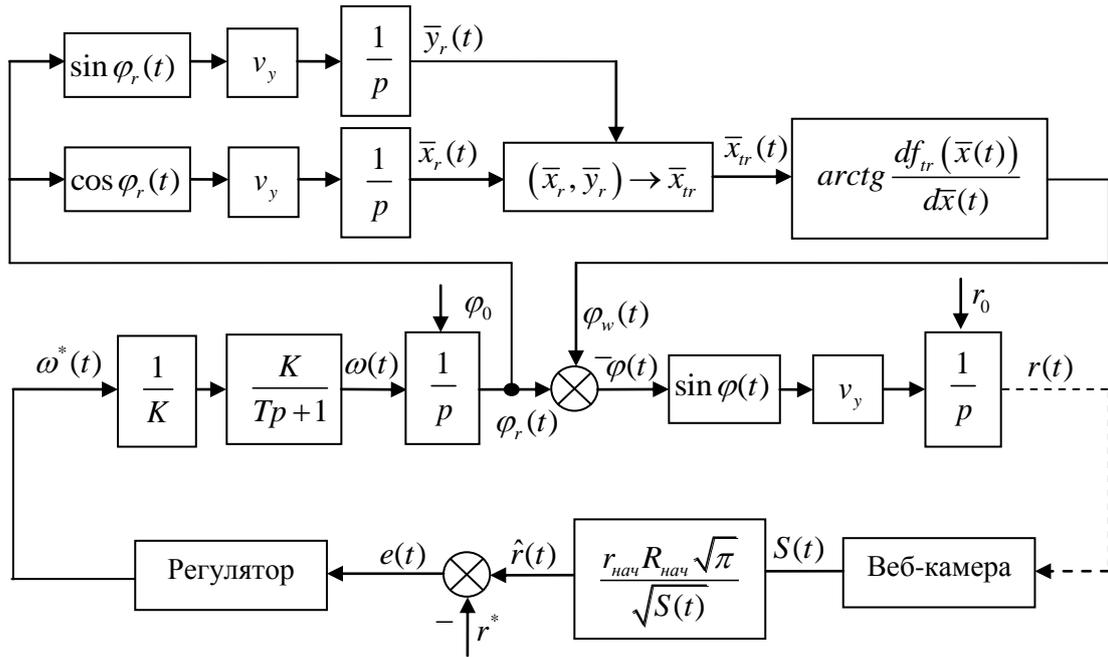


Рисунок 2 – Структурная схема замкнутой системы управления роботом

В качестве примера для моделирования была взята задающая линия, определяющаяся уравнением:

$$f_{mp}(\bar{x}) = -0,5\bar{x} + 0,25\sin 2\bar{x}. \quad (63)$$

Желаемая траектория задается уравнением эквидистанты

$$\bar{x}_{eq}(t) = \bar{x}_{tr}(t) + \frac{0,2\sin^2 \bar{x}_{tr}(t)}{\sqrt{1 + \sin^4 \bar{x}_{tr}(t)}}; \quad \bar{y}_{eq}(t) = \bar{y}_{tr}(t) + \frac{0,2}{\sqrt{1 + \sin^4 \bar{x}_{tr}(t)}}. \quad (64)$$

Результаты моделирования приведены на рисунке 3.

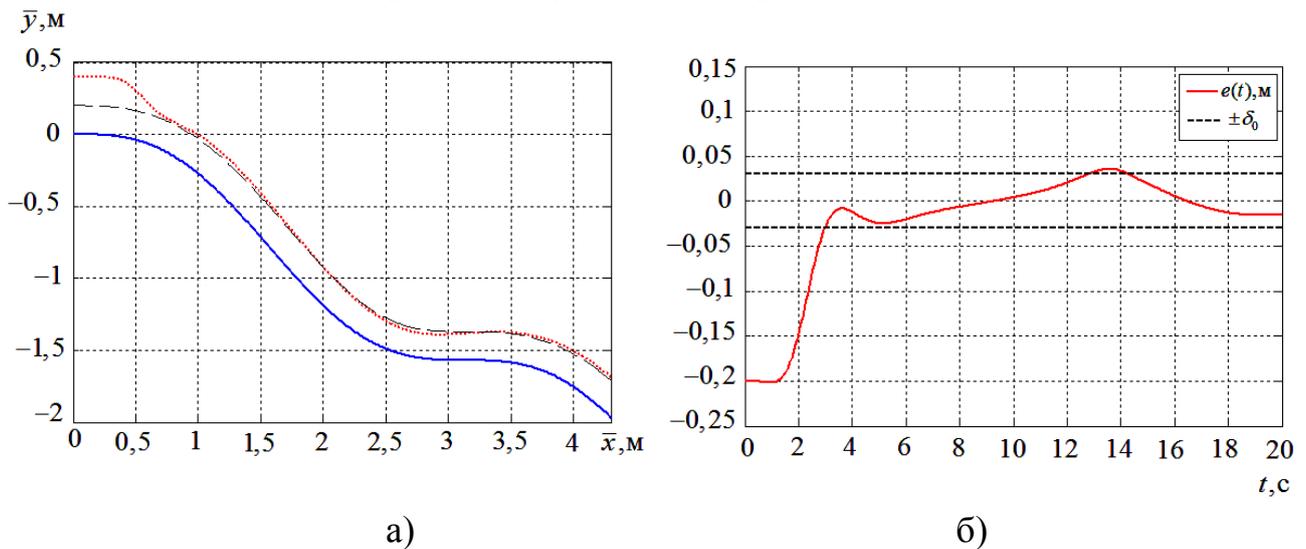


Рисунок 3 – Результаты моделирования движения робота (а – движение робота вдоль задающей линии: — — задающая линия, — — — желаемая траектория, ..... — траектория робота; б – ошибка слежения)

Таким образом, по результатам моделирования ошибка слежения сходится в заданную окрестность за время  $t = 14,2$  с.

Представленный регулятор применяется и в практическом эксперименте. Отличие состоит в том, что для решения задачи управления роботом он должен быть реализован программно, то есть в дискретной форме. Для получения дискретной формы закона управления применяется метод Эйлера, который заключается в формулах приближенного вычисления производной. После простых преобразований закон управления приводится к следующему виду:

$$u(m) = \tilde{k}(m) \left[ (1 - \sigma(m)k_1) \xi_1(m) - \sigma(m)k_1 e(m) \right], \quad (65)$$

$$\xi_1(m+1) = (1 - T_d \sigma(m)k_1) \xi_1(m) - T_d k_1 \sigma(m) e(m), \quad (66)$$

$$\lambda(m) = \begin{cases} \lambda_0, & |e(m)| > \delta_0 \\ 0, & |e(m)| \leq \delta_0, \end{cases} \quad (67)$$

$$\tilde{k}(m+1) = \tilde{k}(m) + T_d \lambda(m), \quad (68)$$

$$\sigma(m) = \sigma_0 \left( \tilde{k}(m) \right)^2, \quad (69)$$

где  $T_d$  – величина интервала дискретности,  $m$  – номер интервала дискретности.

Задача управления роботом решается в два этапа. На первом шаге осуществляется поиск направляющей линии. Робот движется вперед в направлении оптической оси веб-камеры до тех пор, пока не встречает препятствие, о чем сигнализируют дальномеры. После этого осуществляется поворот вокруг своей оси по часовой стрелке до тех пор, пока в направлении движения не исчезнет препятствие. Затем робот снова движется вперед.

Параллельно осуществляется обработка изображения, формируемого веб-камерой, на предмет наличия сегментов направляющей линии (кругов). Как только они найдены, осуществляется второй шаг – движение вдоль направляющей, перпендикулярно оптической оси веб-камеры. Здесь реализуется рассмотренный выше закон управления. Угловая скорость вращения робота вокруг своей оси управляется с помощью «последовательного компенсатора».

Проведенный эксперимент подтверждает работоспособность полученного закона управления. График ошибки слежения представлен на рисунке 4.

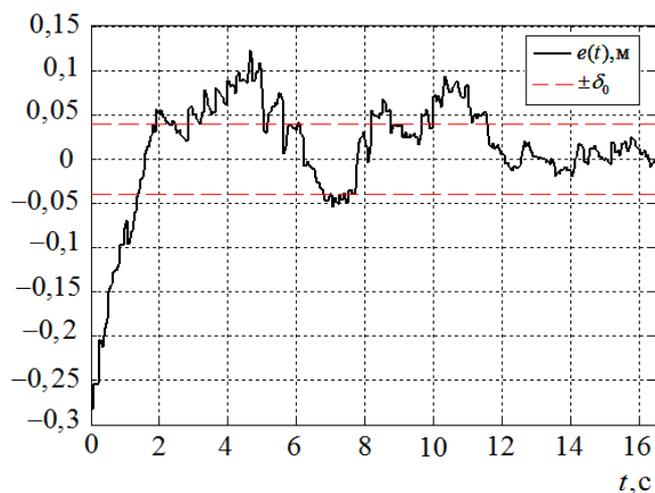


Рисунок 4 – График ошибки слежения при движении «Robotino»

По результатам видно, что ошибка слежения сходится в заданную окрестность.

## Заключение

В диссертационной работе решена научная задача, связанная с синтезом алгоритмов управления техническими объектами, математическое описание которых представлено в виде нелинейной одноканальной или многоканальной модели с запаздыванием по состоянию и неучтенной динамикой, в условиях действия возмущений.

Приведенные в диссертационной работе исследования могут быть представлены в виде следующих результатов.

1. Разработан компенсатор последовательного типа, обеспечивающий экспоненциальную устойчивость при управлении минимально-фазовыми объектами с запаздыванием по состоянию, с секторно ограниченной нелинейностью и неучтенной динамикой при известной относительной степени в условиях параметрической неопределенности.

2. Получен алгоритм управления для случая действия на объект внешнего ограниченного возмущения.

3. Синтезирован модифицированный алгоритм управления для случая неизвестной относительной степени модели объекта.

4. Получен компенсатор последовательного типа для минимально-фазовых многоканальных систем управления с запаздыванием по состоянию, с секторно ограниченной нелинейностью и неучтенной динамикой при известной относительной степени в условиях полной параметрической неопределенности.

5. Разработан алгоритм управления мобильным роботом «Robotino». Проведен эксперимент, подтверждающий полученные результаты.

## Публикации

Публикации в изданиях из перечня ВАК:

1. Фаронов, М.В. Управление по выходу нелинейными системами с запаздыванием в условиях неучтенной динамики [Текст] / А.А. Бобцов, М.В. Фаронов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – №3. – С. 79-87. – 0,56/0,28 п.л. (Faronov M. Output Control of Nonlinear Delay Systems with Unmodeled Dynamics [Текст] / A. Bobtsov, M. Faronov // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2011. – №3(50). – P. 429-437. – 0,56/0,28 п.л.).
2. Фаронов, М.В. Робастное управление мобильными роботами с использованием технического зрения [Текст] / М.В. Фаронов, А.А. Пыркин, И.Б. Фуртат [и др.] // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2012. – №12 (55). – С. 63-65. – 0,19/0,07 п.л.
3. Фаронов, М.В. Адаптивное управление по выходу многоканальными линейными стационарными параметрически неопределенными системами [Текст] / А.А. Бобцов, М.В. Фаронов, И.Б. Фуртат [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – №6 (94). – С. 63-71. – 0,56/0,35 п.л.

Прочие публикации:

4. Faronov, M. Adaptive Output Control of Disturbed Time-Delay Nonlinear System in Condition of Full Parametric Uncertainty [Текст] / M. Faronov, A. Pyrkin // Proceedings of The 13th International Student Olympiad on Automatic Control BOAC. – Saint-Petersburg: Polytechnic University. – 2010. – P. 64-69. – 0,38/0,19 п.л.
5. Faronov, M. Robust Output Stabilization of Time-Delay Nonlinear System [Текст] / A. Bobtsov, A. Pyrkin, M. Faronov [и др.] // Proceedings of The 18th IFAC World Congress. – 2011. – P. 5124-5129. – 0,38/0,08 п.л.
6. Faronov, M. Adaptive and Robust Control of Disturbed Nonlinear Nonstationary Systems with Unknown Relative Degree [Текст] / M. Faronov, A. Pyrkin // Proceedings of The 14th International Student Olympiad on Automatic Control BOAC. – Saint-Petersburg: NIUITMO. – 2011. – P. 25-30. – 0,38/0,19 п.л.
7. Faronov, M. Output Control Approach "Consecutive Compensator" Providing Exponential and L-infinity-stability for Nonlinear Systems with Delay and Disturbance [Текст] / A. Pyrkin, A. Bobtsov, S. Kolyubin [и др.] // Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Control Applications. – 2011. – P. 1499-1504. – 0,38/0,06 п.л.

8. Faronov, M. Output Control for Time-Delay Nonlinear System Providing Exponential Stability [Текст] / A. Bobtsov, A. Pyrkin, M. Faronov // Proceedings of The 19th Mediterranean Conference on Control and Automation – 2011. – P. 515-520. – 0,38/0,13 п.л.

9. Фаронов, М.В. Адаптивное и робастное управление нелинейными системами с неучтенной динамикой [Текст] / М.В. Фаронов, А.А. Пыркин // Материалы докладов XIII конференции молодых ученых "Навигация и управление движением". Науч. редактор д.т.н. О.А.Степанов. Под общ. ред. В.Г.Пешехонова. – Санкт-Петербург, 2011. – С. 277-284. – 0,5/0,25 п.л.

10. Faronov, M. Output Controller for Uncertain Nonlinear Systems with Structural, Parametric, and Signal Disturbances [Текст] / A. Pyrkin, A. Bobtsov, S. Kolyubin [и др.] // 2012 IEEE International Conference on Control Applications. – 2012. – P. 1528-1533. – 0,38/0,1 п.л.

11. Фаронов, М.В. Адаптивное управление нелинейными системами с неточно заданной относительной степенью в условиях полной параметрической неопределенности [Текст] / М.В. Фаронов, А.А. Пыркин // Материалы докладов XIV конференции молодых ученых "Навигация и управление движением". Науч. редактор д.т.н. О.А.Степанов. Под общ. ред. В.Г.Пешехонова. – Санкт-Петербург, 2012. – С. 498-505. – 0,5/0,25 п.л.

12. Фаронов, М.В. Адаптивное управление мобильным роботом с использованием системы технического зрения [Текст] / М.В. Фаронов, А.А. Пыркин // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых – СПб.: НИУИТМО, 2013. – Выпуск 1. – С. 179-180. – 0,06/0,03 п.л.

13. Faronov, M. Simple Adaptive Tracking Control for Mobile Robots [Текст] / A. Bobtsov, M. Faronov, S. Kolyubin, A. Pyrkin // 10th International Conference on Mathematical Problems, Engineering, Aerospace and Sciences: ICNPAA 2014. – Vol. 1637, № 1. – P. 1433-1441. – 0,56/0,14 п.л.

14. Faronov, M. Adaptive Control of Linear MIMO Systems [Текст] / A. Bobtsov, M. Faronov, I. Furtat, [и др.] // Proceedings of The 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). – 2014. – P. 678-683. – 0,38/0,19 п.л.