

На правах рукописи



Громов Владислав Сергеевич

**Адаптивные алгоритмы управления в условиях параметрически
неопределенных возмущающих воздействий**

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

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

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Пыркин Антон Александрович

Официальные оппоненты:

Пакшин Павел Владимирович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева - Арзамасский политехнический институт (филиал), кафедра Прикладной математики, заведующий кафедрой

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

Ведущая организация: Институт Проблем Машиноведения Российской Академии Наук (ИПМаш РАН)

Защита состоится 30 ноября 2017 г. в 18 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. 359.

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/?page1=16&page2=52&page_d=1&page_d2=148704

Автореферат разослан «16» октября 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Дударенко Наталия Александровна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Проблема управления в условиях действия возмущающих воздействий является фундаментальной и актуальной задачей современной теории автоматического управления. Для широкого класса технических систем обеспечение необходимого качества регулирования, как правило, сопряжено с негативным влиянием возмущений. Заметим, что в терминах компенсации возмущающего воздействия может быть также сформулирована классическая задача слежения за задающим воздействием, недоступным для прямого измерения. На сегодняшний день задачи управления в условиях воздействий, динамические модели которых являются нелинейными операторами и содержат неизвестные параметры, до сих пор не имеют систематического решения.

В классе задач оценивания параметров внешнего возмущающего воздействия зачастую рассматривается линейный генератор полигармонического сигнала как источник возмущения, действующего на состояние и выход системы. Подобные задачи рассматривались многими авторами как в российских, так и зарубежных изданиях (Ортега Р., Никифоров В.О., Бобцов А.А., Бодсон М., Марино Р., Томей П. и многие другие). Для возмущений, описываемых полигармоническими функциями времени, разработано большое количество различных подходов и методов адаптивного управления, однако вопрос улучшения показателей качества адаптивных алгоритмов остаётся открытым.

Для описания возмущающих воздействий также рассматривают модели нелинейных генераторов. В ряде работ рассмотрены задачи управления в условиях действия внешних возмущений, описываемых хаотическими сигналами (Ефимов Д.В., Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л., Запатеиро М. и другие), так как для них возможно построение алгоритмов оценивая параметров и прогнозирования на ограниченное время вперёд. Известен подход к решению задачи компенсации возмущений, описываемых нелинейным генератором, основанный на обобщении метода внутренней модели (Исидори А., Маркони Л., Прали Л.), однако, задача управления с компенсацией нелинейных возмущающих воздействий с неизвестными параметрами не рассматривалась.

В диссертации предложены новые алгоритмы быстрой оценки параметров линейных и нелинейных генераторов. Предложены новые алгоритмы быстрой компенсации линейных колебаний на основе оценок параметров возмущения. Разработана адаптивная версия обобщенного метода внутренней модели и решена задача компенсации нелинейных и хаотических колебаний. Приведены результаты экспериментальной апробации алгоритмов адаптивного управления на примере адаптивной следящей системы, построенной с использованием робототехнического комплекса, оснащенного средствами компьютерного зрения.

Целью работы является синтез алгоритмов адаптивного управления по выходу в условиях действия параметрически неопределенных возмущающих воздействий, описываемых линейными и нелинейными колебаниями, с приложением для адаптивной следящей системы.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Разработаны алгоритмы быстрого адаптивного оценивания параметров линейных и нелинейных генераторов сигналов.
2. Разработан алгоритм быстрой компенсации линейных колебаний для систем с запаздыванием на основе оценивания параметров возмущения.
3. Разработан алгоритм компенсации нелинейных колебаний с неизвестными параметрами на основе метода нелинейной внутренней модели.

Научная новизна. Разработан алгоритм быстрой оценки параметров мультигармонического сигнала с экспоненциальной сходимостью к нулю ошибок оценивания. Разработан алгоритм оценивания параметров хаотического генератора Дуффинга. Решена задача управления объектом, подверженного влиянию внешних линейных колебаний и запаздывания. Предложено решение задачи компенсации возмущающих воздействий для нелинейных систем некоторого класса. Показана применимость разработанных алгоритмов для решения задачи слежения за полигармоническими, нелинейными и хаотическими сигналами с приложением для робототехнической системы.

Теоретическая и практическая значимость. В диссертационном исследовании развиваются методы адаптивного управления в условиях наличия параметрически неопределенных возмущающих воздействий. Разработанный комплекс алгоритмов компенсации внешнего возмущающего воздействия может быть применен в различных телемеханических системах контроля технологического процесса, где возмущения создаются как рядом расположенными устройствами и установками (например, механические вибрации или электромагнитные наводки от близко расположенных устройств) так и самой внешней средой (колебания температуры или другого параметра среды). Адаптивные алгоритмы могут быть применены в системах активной виброзащиты, системах управления роботами различного назначения, для которых характерны циклические операции или функционирование в подвижной внешней среде. С развитием цифровых систем управления, промышленной и персональной робототехники область применения разработанных алгоритмов будет лишь увеличиваться.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовался спектр доступных методов современной теории управления для адаптивных и робастных систем, включающий методы нелинейной теории управления и синтеза наблюдателей динамических систем. При доказательстве положений диссертации использовались методы пространства состояний, преобразования Лапласа, аппарат функций Ляпунова. В работе развивался метод разработки закона управления на основе сигналов, непрерывно поступающих от оценок задающего воздействия. Метод их расчета базируется на интегральных методах идентификации. В работе развиваются разработанные ранее методы оценки параметров гармонических и полигармонических сигналов. При разработке регулятора были использованы частотные свойства линейных генераторов. Апробация разработанных законов управления проводилась численным моделированием в программной среде MATLAB, а также на базе робота-манипулятора Kuka Youbot.

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритмы быстрого оценивания параметров линейных и нелинейных генераторов с экспоненциальной сходимостью к нулю ошибок оценивания.
2. Алгоритм быстрой компенсации полигармонического возмущающего воздействия с экспоненциальной сходимостью к нулю переменных состояния замкнутой системы.
3. Алгоритм компенсации нелинейных колебаний с использованием метода нелинейной внутренней модели.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 38 печатных изданиях [1–38], включая 8 статей в журналах, входящих в перечень ВАК [1–8], 25 статей в сборниках трудов международных конференций, индексируемых в системах Web of Science и Scopus [9–33], одно учебное пособие [34], четыре свидетельства о регистрации программы для ЭВМ [35–38].

Степень достоверности и апробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались на следующих международных конференциях:

- 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control (7-ая конференция по промышленному моделированию, менеджменту и управлению, 19–21 июня 2013, Санкт-Петербург, Россия) [18, 30];
- 11th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing (11-ая международный семинар по адаптации и обучению в управлении и обработке сигналов, 3–5 июля 2013, Кан, Франция) [15];
- 22nd Mediterranean Conference on Control and Automation (22-ая средиземноморская конференция по управлению и автоматизации, 16–19 июня 2014, Палермо, Италия) [16, 28];
- 19th IFAC World Congress (19-ый всемирный конгресс международной федерации автоматического управления, 24–29 августа 2014, Кейптан, ЮАР) [13, 14];
- 2014 IEEE Multi-Conference on Systems and Control (Мультиконференция по системам и управлению 2014, 8–10 октября 2014, Антиб, Франция) [12, 29];
- 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems (1-ая конференция по моделированию, идентификации и управлению нелинейными системами, 24–26 июня 2015, Санкт-Петербург, Россия) [17, 27];
- 34th Chinese Control Conference (34-ая китайская конференция по управлению, 28–30 июля 2015, Ханчжоу, Китай) [26];
- 11th IFAC Symposium on Advances in Control Education (11-ый симпозиум по достижениям в области преподавания управления, 1–3 июня, Братислава, Словакия) [20, 24];
- 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (24-ая средиземноморская конференция по управлению и автоматизации, 21–24 июня 2016, Афины, Греция) [10, 21];
- 12th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing (12-ый международный семинар по адаптации и обучению в управлении и обработке сигналов, 29 июня – 1 июля 2016, Эйндховен, Нидерланды) [11, 25];
- 11th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences (11-ый международная конференция по математическим проблемам в инженерии, авиапромышленности и естественных науках, 5–8 июля, Ла-Рошель, Франция) [22];
- 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (21-ый международная конференция по методам и моделям в автоматизации и робототехнике, 29 августа – 1 сентября 2016, Мендзыздрое, Польша) [23];
- 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (42-ая ежегодная конференция сообщества промышленной электроники, 24–27 октября 2016, Флоренция, Италия) [19];
- 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (25-ая средиземноморская конференция по управлению и автоматизации, 3–6 июля, Валетта, Мальта) [31];
- 20th IFAC World Congress (20-ый всемирный конгресс международной федерации автоматического управления, 9–14 июля 2017, Тулуза, Франция) [32, 33];

Работа выполнена на кафедре Систем управления и информатики, поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (Госзадание проект 2.8878.2017/8.9, «Методы адаптивного управления нелинейными системами с запаздыванием и неопределенностями»; проект 14.Z50.31.0031, «Робастные и адаптивные системы управления, коммуникации и вычисления») и при го-

сударственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01 «Нелинейное и адаптивное управление сложными системами»). Результаты работы использованы при выполнении следующих НИОКР: НИР «Разработка методов планирования и управления движением робота-манипулятора с учетом сил взаимодействия робота с объектом манипулирования, окружающей средой, другим роботом или с человеком», Госзадание 2014/190 «Развитие методов адаптивного и робастного управления сложными нелинейными системами с применением к мехатронным и робототехническим приложениям», программа повышения конкурентоспособности Университета ИТМО, Гранты правительства Санкт-Петербурга «для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга» 2014–2016 годов.

Личный вклад. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем все представленные в диссертации результаты получены лично автором. Соискателем был разработан комплекс новых адаптивных алгоритмов управления по выходу в условиях параметрически неопределенных возмущающих воздействий. В рамках комплекса были разработаны алгоритмы быстрой оценки параметров для линейных и нелинейных генераторов сигнала возмущения [2, 16, 33]. Разработан алгоритм компенсации линейного возмущающего воздействия, представленного полигармоническим сигналом, методом непрямой адаптации [3, 9–15]. Для определенного класса генераторов нелинейных колебаний соискателем был разработан алгоритм компенсации нелинейных колебаний на основе метода прямой адаптации [1, 5–8, 17, 18, 25–31]. Разработанные алгоритмы были проверены на работоспособность на робототехнической установке с применением системы технического зрения [4, 19–24, 32, 34–38].

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 125 страниц с 22 рисунками. Список литературы содержит 113 наименований.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в диссертационной работе, формулируются цель, задачи, а также научная новизна и практическая значимость.

Первая глава посвящена обзору методов управления в условиях внешних возмущающих воздействий, запаздывания, неполной информации о параметрах и переменных состояния системы. Сформулирована обобщенная постановка задачи.

Рассматривается объект управления, подверженный влиянию неопределенных внешних ограниченных возмущающих воздействий:

$$\dot{x} = f(x, w) + g(x, w)u, \quad (1)$$

$$e = h(x, w), \quad (2)$$

$$\dot{w} = S(w, \rho), \quad (3)$$

где $x(t) \in \mathbb{R}^n$ — вектор состояния; $u(t) \in \mathbb{R}^m$ — сигнал управления; $e(t) \in \mathbb{R}^m$ — ошибка слежения за задающим сигналом либо ошибка стабилизации объекта управления (в зависимости от задачи); $f(x, w), g(x, w), q(x, w)$ — векторные функции векторных аргументов x, w ; $w(t) \in \mathbb{R}$ — вектор состояния возмущения; $\rho \in \mathbb{R}$ — вектор параметров возмущения; $S(w, \rho)$ — векторная функция вектор-

ных аргументов w, ρ . В зависимости от характера возмущающего воздействия, рассматриваются три задачи.

Задача 1. Рассматривается объект вида (3) с учётом следующих допущений:

Допущение 1. Пусть измеряется сигнал $v = q^T w$.

Целью этой задачи является оценивание параметров генератора сигнала, а именно нахождение оценки $\hat{\rho}$ такой, что:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\rho - \hat{\rho}(t)| = 0. \quad (4)$$

В Главе 2 представлено решение Задачи 1.

Задача 2. Рассматривается модель вида (1)–(3) с учётом следующих допущений:

Допущение 2. Пусть $S(w, \rho) = S(\rho)w$, где вектор w не измеряется.

Допущение 3. Пусть $f(x, w) = Ax + Pw$, $g(x, w) = B$, $h(x, w) = Cx + Qw$.

Целью этой задачи является компенсация линейных колебаний, а именно нахождение управления вида $u = u(\hat{\rho}, \hat{w})$, обеспечивающего ограниченность сигналов системы и:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0. \quad (5)$$

В Главе 3 представлено решение Задачи 2, проведено экспериментальное исследование разработанного алгоритма на робототехнической установке.

Задача 3. Рассматривается модель вида (1)–(3) с учётом следующих допущений: *Допущение 4.* Известен номинальный закон управления $u_0 = u(x, w)$, где векторы x и w недоступны для измерений, обеспечивающий сходимость ошибки e к нулю.

Допущение 5. Существует глобальный диффеоморфизм $\sigma = \sigma(w)$ такой, что:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= F\sigma + G\gamma(\sigma), \\ \gamma(\sigma) &= u_0. \end{aligned}$$

где $\sigma(w)$ является вектором состояния, связанный с $w(t)$ диффеоморфизмом. Целью этой задачи является компенсация нелинейных колебаний, а именно нахождение управления вида $u = u(\hat{w}, \hat{\rho})$, обеспечивающего ограниченность сигналов системы и:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0. \quad (6)$$

В Главе 4 представлено решение Задачи 3, проведено экспериментальное исследование разработанного алгоритма на робототехнической установке.

Во второй главе представлено решение Задачи 1 для линейных и нелинейных генераторов сигнала.

В случае *линейного генератора* сигнала рассматривается доступный для измерения сигнал возмущения вида

$$v(t) = \sigma + \sum_{i=1}^l [\mu_i \sin(\omega_i t) + \nu_i \cos(\omega_i t)], \quad (7)$$

содержащая неизвестное смещение σ и l синусоид с неизвестными амплитудами μ_i, ν_i и частотами $\omega_i, i = \{1, 2, \dots, l\}$. Нижняя граница частот ω_0 предполагается известной. Все частоты $\omega_i, i = \{1, 2, \dots, l\}$ являются различными.

Вводится в рассмотрение фильтр сигнала $v(t)$

$$\xi(t) = \frac{\lambda^{2l+1}}{(p + \lambda)^{2l+1}} v(t), \quad (8)$$

где $(p + \lambda)^{2l+1}$ – гурвицев полином.

Показана справедливость линейной регрессионной модели:

$$\xi^{(2l+1)}(t) = v^T(t)\vartheta + \varepsilon(t), \quad (9)$$

где $\varepsilon(t)$ – экспоненциально затухающая функция; регрессор, составленный из производных выхода фильтра задан как

$$v^T(t) = [\xi^{(2l-1)}(t) \ \dots \ \xi^{(3)}(t) \ \xi^{(1)}(t)], \quad (10)$$

вектор с элементами, которые необходимо оценить, определен как:

$$\vartheta^T = [\bar{\theta}_1 \ \dots \ \bar{\theta}_{l-1} \ \bar{\theta}_l]. \quad (11)$$

Для регрессионной модели (9) введем $l - 1$ линейных \mathcal{L}_∞ -устойчивых операторов, например, запаздывания:

$$[H_i(\cdot)](t) := (\cdot)(t - d_i), \quad (12)$$

где $i = \{1, 2, \dots, l - 1\}$, $d_i > 0$ – различные запаздывания. Определим $l - 1$ новых сигнала:

$$v_{f_i}(t) = v(t - d_i), \quad \xi_{f_i}(t) = \xi(t - d_i). \quad (13)$$

Сигналы (13), $v(t)$ и $\xi(t)$ в матричном виде запишем следующим образом:

$$\Upsilon_e(t) := \begin{bmatrix} v^T(t) \\ v_{f_1}^T(t) \\ \vdots \\ v_{f_{l-1}}^T(t) \end{bmatrix}, \quad \Xi_e(t) := \begin{bmatrix} \xi(t) \\ \xi_{f_1}(t) \\ \vdots \\ \xi_{f_{l-1}}(t) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где $\Upsilon_e(t) \in \mathbb{R}^{l \times l}$, $\Xi_e(t) \in \mathbb{R}^{l \times 1}$.

Вычислим функции:

$$\psi_\phi(t) := \det\{\Upsilon_e(t)\}, \quad \Xi(t) := \text{adj}\{\Upsilon_e(t)\}\Xi_e(t). \quad (15)$$

Таким образом, получим набор l уравнений вида:

$$\Xi_i(t) = \psi_\phi \vartheta_i, \quad (16)$$

где $i = \{1, 2, \dots, l\}$.

Утверждение 1. Устройство оценки частоты вида:

$$\dot{\hat{\vartheta}}_i(t) = \gamma_i \psi_\phi(t) \left(\Xi_i(t) - \psi_\phi(t) \hat{\vartheta}_i(t) \right), \quad (17)$$

где $\gamma_i > 0$, $\hat{\theta}_i = -\hat{\omega}_i^2$, обеспечивает сходимость к нулю ошибок оценивания $\lim_{t \rightarrow \infty} |\omega_i - \hat{\omega}_i(t)| = 0$.

Задача идентификации параметров *нелинейного возмущения* рассмотрена на примере нелинейного генератора хаотического сигнала:

$$\begin{aligned} v(t) &= y(t), \\ \ddot{y}(t) + c_1 \dot{y}(t) + c_2 y(t) - \bar{\theta} f(t) - \delta(t) &= 0, \end{aligned} \quad (18)$$

где c_1 , c_2 и $\bar{\theta}$ – неизвестные числа, $f(y) = y^3$ – нелинейная функция, $\delta(t) = A \sin(\omega t + \phi)$ – неизмеряемый гармонический сигнал. Генератор (18) – хаотическая система Дуффинга. Основной задачей стоит разработка наблюдателя,

обеспечивающего сходимость оценок неизвестных параметров к истинным значениям. Доступны для измерения только выходные переменные $y(t)$ и $f(t)$ модели.

Выполним двойное дифференцирование и преобразование Лапласа для модели генератора, получим:

$$s^4 Y(s) = a_1(s)Y(s) + a_2(s)F(s) + D(s), \quad (19)$$

где s — оператор Лапласа, $Y(s) = L\{y(t)\}$, $F(s) = L\{f(y(t))\}$ — изображение Лапласа для $y(t)$ и $f(y(t))$ соответственно, полином $D(s)$ — сумма всех элементов, содержащих начальные условия.

Преобразуем модель (19) в следующем виде:

$$\frac{p^4 \lambda^4}{(p + \lambda)^4} y(t) = \frac{a_1(p) \lambda^4}{(p + \lambda)^4} y(t) + \frac{a_2(p) \lambda^4}{(p + \lambda)^4} f(t) + \epsilon_y(t), \quad (20)$$

где λ — настраиваемый коэффициент, $\epsilon_y(t) = L^{-1} \left\{ \frac{D(s) \lambda^4}{(s + \lambda)^4} \right\}$ — экспоненциально затухающая функция времени, вызванной начальными условиями. Пренебрегая экспоненциально затухающими компонентами $\epsilon_y(t)$, параметризована модель (20).

Введем вспомогательные фильтры:

$$\xi_1(t) = \frac{\lambda^4}{(p + \lambda)^4} y(t), \quad \xi_2(t) = \frac{\lambda^4}{(p + \lambda)^4} f(t). \quad (21)$$

Получим, таким образом, регрессионную модель, состоящую из измеряемых функций и неизвестных постоянных параметров:

$$z(t) = \gamma_1 \psi_1(t) + \gamma_2 \psi_2(t) + \gamma_3 \psi_3(t) + \gamma_4 \psi_4(t) + \gamma_5 \psi_5(t) + \gamma_6 \psi_6(t), \quad (22)$$

где $z(t) = \xi_1^{(4)}(t)$, $\psi_1(t) = \xi_1^{(3)}(t)$, $\psi_2(t) = \xi_1^{(2)}(t)$, $\psi_3(t) = \xi_1^{(1)}(t)$, $\psi_4(t) = \xi_1(t)$, $\psi_5(t) = \xi_2^{(2)}(t)$, $\psi_6(t) = \xi_2(t)$.

Введем 5 линейных, \mathcal{L}_∞ -устойчивых операторов $H_j : \mathcal{L}_\infty \rightarrow \mathcal{L}_\infty$, $j \in \{1, 2, \dots, 5\}$, выходные переменные которых для любого ограниченного входа могут быть представлены как

$$(\cdot)_{f_j}(t) = [H_j(\cdot)](t) + \epsilon_t, \quad (23)$$

где ϵ_t — экспоненциально затухающий элемент. Выберем оператор запаздывания $[H_j(\cdot)](t) = (\cdot)(t - d_j)$, где $d_j \in \mathbb{R}_+$.

Получим фильтрованные регрессии:

$$z_{f_j} = m_{f_j}^T \gamma. \quad (24)$$

Построим расширенный регрессор системы вида:

$$Z_e(t) = M_e(t) \gamma, \quad (25)$$

где $Z_e : \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}^6$ и $M_e : \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}^{6 \times 6}$ как

$$Z_e = \text{col}(z, z_{f_1}, \dots, z_{f_5}), \quad M_e^T = [m \ m_{f_1} \ \dots \ m_{f_5}]. \quad (26)$$

Перемножая (25) на присоединенную матрицу M_e , получим 6 скалярных регрессоров в следующей форме:

$$Z_i(t) = \phi(t) \gamma_i \quad (27)$$

и $i = \overline{1, 6}$, где представлен определитель M_e как

$$\phi(t) = \det \{M_e(t)\} \quad (28)$$

конечный вектор $Z : \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}^6$

$$Z(t) = \text{adj} \{M_e(t)\} Z_e(t). \quad (29)$$

Утверждение 2. Алгоритм оценивания параметров γ_i вида:

$$\dot{\hat{\gamma}}_i = k_i \phi (Z_i - \phi \hat{\gamma}_i), \quad (30)$$

с настраиваемым коэффициентом $k_i > 0$, обеспечивает сходимость к нулю ошибок оценивания $\lim_{t \rightarrow \infty} |\gamma_i - \hat{\gamma}_i(t)| = 0$.

На рисунке 1 показаны результаты математического моделирования для предлагаемого подхода в задаче оценки неизвестного параметра θ для следующих параметров хаотической системы Дуффинга (18): $c_1 = 0$; $c_2 = 0,5$; $\bar{\theta} = -1$; $\delta(t) = \sin(0,1t)$.

В третьей главе представлено решение Задачи 2 для линейных колебаний.

Для задачи компенсации линейных возмущающих воздействий рассматривается объект управления вида:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - D) + Bv(t), \quad (31)$$

$$y(t) = Cx(t) + Qv(t), \quad (32)$$

где $x \in \mathbb{R}^n$ — неизмеряемый вектор состояния, $y \in \mathbb{R}$ — регулируемая переменная, доступная для измерения, $u \in \mathbb{R}$ — управляющее воздействие с начальными условиями в блоке запаздывания $u(t - D) = 0$ при $t < D$, $D \geq 0$ — известное постоянное запаздывание, A, B, C — матрицы соответствующих размерностей с известными параметрами, Q — известное число.

Возмущающее воздействие $v(t)$ имеет вид

$$v(t) = \sigma + \sum_{i=1}^k E_i \sin(\omega_i t + F_i) \quad (33)$$

и представляет собой сумму постоянного смещения σ и k гармоник $\delta_i(t)$ с неизвестными частотами ω_i , амплитудами E_i , начальными фазами F_i .

Выражение (33) перепишем в виде:

$$v(t) = \sigma + \sum_{i=1}^k [\mu_i \sin(\omega_i t) + \nu_i \cos(\omega_i t)], \quad (34)$$

где $\mu_i = E_i \cos(F_i)$ и $\nu_i = E_i \sin(F_i)$.

Целью — синтез закона управления в форме обратной связи от выходной переменной $u = u(y)$, обеспечивающего ограниченность всех сигналов в замкнутой системе и экспоненциальную сходимость к нулю переменных состояния. Количество гармоник k известно. Параметры A, B, C и α известны. Тройка матриц (A, B, C) полностью управляемая и наблюдаемая. Известна нижняя граница частот ω_0 : $\omega_i \geq \omega_0, i = \overline{1, k}$. Расстояние между соседними частотами сигнала $y(t)$ не меньше некоторого известного числа ϵ_0 , т.е. $|\omega_i - \omega_j| \geq \epsilon_0, \forall i \neq j, i, j = \overline{1, k}$.

Используем модель невязки вида:

$$\tilde{y}(t) = \bar{\sigma} + \sum_{i=1}^k [\bar{\mu}_i \sin(\omega_i t) + \bar{\nu}_i \cos(\omega_i t)] + \bar{\varepsilon}(t), \quad (35)$$

где $\bar{\sigma}$, $\bar{\mu}_i$, $\bar{\nu}_i$ — константы и $\bar{\varepsilon}(t)$ — экспоненциально затухающая функция.
Введем в рассмотрение фильтр:

$$\xi(s) = \frac{\gamma_0}{\gamma(s)} \tilde{y}(s), \quad (36)$$

$\gamma_0 > 0$, $\gamma(s) = s^{2k} + \gamma_{2k-1} s^{2k-1} + \dots + \gamma_1 s + \gamma_0$ — гурвицев полином степени $2k$.
Используем фильтр (36) для получения регрессионной модели вида

$$\xi^{(2k+1)}(t) = \Omega^T(t) \bar{\Theta} + \varepsilon(t), \quad (37)$$

где $\Omega^T(t) = [\xi^{(2k-1)}(t) \dots \xi^{(3)}(t) \xi^{(1)}(t)]$ — вектор, составленный из функций $\xi^{(j)}(t)$, являющихся производными выходной переменной фильтра (36),

$$\xi^{(j)}(s) = \frac{\gamma_0 s^j}{\gamma(s)} \tilde{y}(s), \quad (38)$$

и $\bar{\Theta}^T = [\bar{\theta}_1 \dots \bar{\theta}_{k-1} \bar{\theta}_k]$ — вектор параметров, зависящий от частот, где $\theta_i = -\omega_i^2$, функция $|\varepsilon(t)| \leq \rho_0 e^{-\lambda t}$ и ее производные ограничены и экспоненциально стремятся к нулю, числа ρ_0 , λ больше 0.

Алгоритм настройки

$$\hat{\omega}_i = \sqrt{|\hat{\theta}_i|}, \quad (39)$$

где оценки θ_i рассчитаны на основе $\hat{\theta}_i$, являющихся элементами вектора $\hat{\Theta}$:

$$\hat{\Theta}(t) = \Upsilon(t) + \Gamma \Omega(t) \xi^{(2k)}(t), \quad (40)$$

$$\dot{\Upsilon}(t) = -\Gamma \Omega(t) \Omega^T(t) \hat{\Theta}(t) - \Gamma \dot{\Omega}(t) \xi^{(2k)}(t), \quad (41)$$

где $\Gamma = \Gamma^T > 0$, обеспечивает экспоненциальную сходимость ошибок оценивания $\tilde{\omega}_i = \omega_i - \hat{\omega}_i$ к нулю:

$$|\tilde{\omega}_i(t)| \leq \rho_1 e^{-\beta_1 t}, \quad \rho_1 > 0, \beta_1 > 0, \quad \forall t \geq 0. \quad (42)$$

Реализуемая схема оценивания для переменных ξ_0 и $\xi_i(t)$ имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \hat{\xi}_1(t) \\ \vdots \\ \hat{\xi}_k(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\theta}_1 & \dots & \hat{\theta}_k \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\theta}_1^k & \dots & \hat{\theta}_k^k \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \xi^{(2)}(t) \\ \vdots \\ \xi^{(2k)}(t) \end{bmatrix}, \quad \hat{\xi}_0(t) = \xi(t) - \sum_{i=1}^k \hat{\xi}_i(t). \quad (43)$$

Вычислено смещение:

$$\hat{\sigma} = \frac{a_0}{b_0} \hat{\xi}_0(t). \quad (44)$$

Рассмотрим $s_i(t) = \begin{bmatrix} M_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \\ M_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \end{bmatrix}$ — регрессор.

Алгоритм вычисления компонент регрессоров $\varsigma_i(t)$ имеет вид:

$$\hat{\varsigma}_i^T(t) = \begin{bmatrix} \hat{\vartheta}_i(t) & \frac{\hat{\vartheta}_i(t)}{\eta_i(t)} \end{bmatrix}, \quad \eta_i(t) = \begin{cases} \hat{\omega}_i(t), & \text{если } \hat{\omega}_i \geq \omega_0, \\ \omega_0 & \text{иначе.} \end{cases} \quad (45)$$

В итоге запишем алгоритм оценивания амплитуд μ_i и ν_i :

$$\dot{\hat{\mu}}_i(t) = k_\mu \hat{\vartheta}_i(t) \left(\hat{\xi}_i(t) - \hat{\mu}_i(t) \hat{\vartheta}_i(t) - \hat{\nu}_i(t) \frac{\hat{\vartheta}_i(t)}{\eta_i(t)} \right), \quad (46)$$

$$\dot{\hat{\nu}}_i(t) = k_\nu \frac{\hat{\vartheta}_i(t)}{\eta_i(t)} \left(\hat{\xi}_i(t) - \hat{\mu}_i(t) \hat{\vartheta}_i(t) - \hat{\nu}_i(t) \frac{\hat{\vartheta}_i(t)}{\eta_i(t)} \right), \quad (47)$$

где $k_\mu, k_\nu > 0$, и функция $\eta_i(t)$ определена в (45).

Утверждение 3. Закон управления вида

$$u(t) = -\hat{\delta}(t + D) + \psi(t), \quad (48)$$

обеспечивает ограниченность всех сигналов в замкнутой системе и сходимость к нулю переменных состояния, где $\Psi(z, t) = \psi(t + z - D)$ и $\Psi(0, t) = \psi(t - D)$, $\psi(t)$ — дополнительное управляющее воздействие, которое определено с целью стабилизации замкнутой системы:

$$\psi(t) = K e^{AD} \bar{x}(t) + K \int_0^D e^{A(D-\tau)} B \Psi(\tau, t) d\tau. \quad (49)$$

Для подтверждения практической ценности предлагаемого подхода был проведен ряд экспериментов. Использовалась многозвенная робототехническая система с цифровой камерой, закрепленной на последнем звене. Целью экспериментов являлось осуществление слежения камеры за объектом, отображаемом на LCD мониторе перед роботом. Объект слежения двигался по закону, представленному суммой двух гармоник вдоль вертикальной оси y и суммой трёх гармоник вдоль горизонтальной оси x . Задающие сигналы для обеих подсистем описаны в виде:

$$v_y(t) \approx 11 \sin(0.63t) + 14 \sin(t). \quad (50)$$

$$v_x(t) \approx 12 \sin(1.16t) + 8 \sin(0.90t) + 7 \sin(0.63t) \quad (51)$$

Результаты эксперимента для показаны на рис. 2. Робототехническая следящая система была запущена дважды: с классическим градиентным методом для оценки частот, и с предлагаемым методом быстрой оценки параметров. По оси y для градиентного метода время переходного процесса для оценки параметров сигнала составили 61,1 секунды, против 10,1 секунды для предлагаемого подхода. Время сходимости ошибки составило 39,05 секунд для градиентного метода, против 19,55 секунд для предлагаемого подхода. По оси x время сходимости оценок всех частот равно 33,95 секунды для предлагаемого метода. Время переходного процесса сходимости ошибки составило 29,3 секунды.

В четвёртой главе представлено решение Задачи 3 для нелинейных колебаний.

Рассматривается задача робастного управления по выходу многоканальной нелинейной системой, представленной в виде следующих уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(w, x) + g(w, x)u, \\ e &= h_e(w, x), \\ y &= h(w, x), \end{aligned} \quad (52)$$

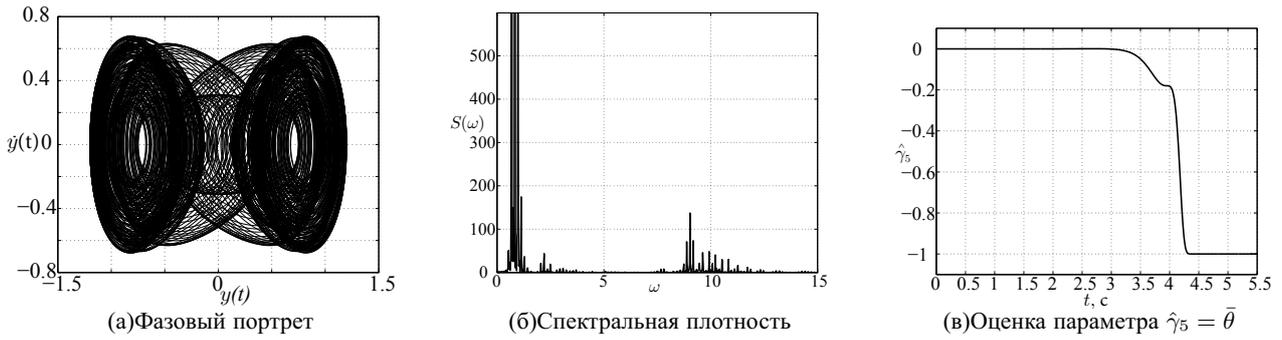


Рисунок 1 – Результаты математического моделирования алгоритма оценки параметра хаотического сигнала.

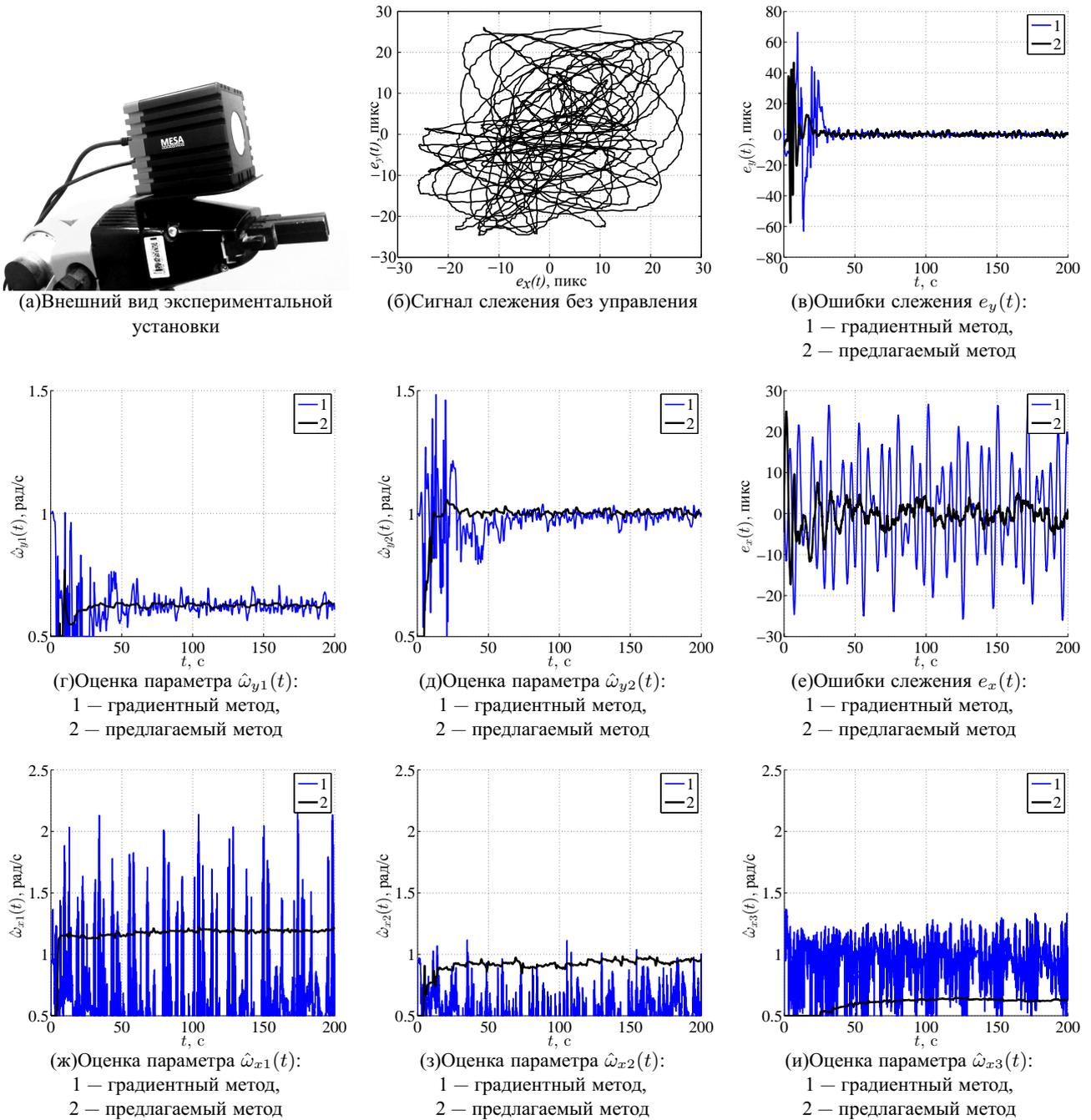


Рисунок 2 – Результаты экспериментального исследования следящей системы с полигармоническим возмущением.

где $x \in \mathbb{R}^n$ — вектор состояния, $u \in \mathbb{R}^m$ — управление, $w \in \mathbb{R}^{n_w}$ — возмущение вида $\dot{w} = S(w)$ с w , находящимся в компактном инвариантном множестве W , $e \in \mathbb{R}^p$ — управляемая переменная, для которой необходимо найти управление, $y \in \mathbb{R}^q$ — дополнительно измеряемая величина, предполагается, доступную для построения обратной связи вместе с e . Задача управления по выходу состоит в построении регулятора обеспечивающего такую замкнутую систему, у которой траектории будут ограничены и $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$.

Утверждение 4. Управление может быть построено, если объект управления связан с внутренней моделью в виде:

$$\begin{aligned}\dot{\eta} &= F\eta + G\left[\frac{1}{k}\gamma(k\eta) + e\right] \\ \bar{e} &= \frac{1}{k}\gamma(k\eta) + e\end{aligned}\quad (53)$$

в котором $\eta = \text{col}(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_p)$, $F = \text{diag}(F_0, F_0, \dots, F_0)$, $G = \text{diag}(G_0, G_0, \dots, G_0)$, $\gamma(k\eta) = \text{col}(\gamma_1(k\eta_1), \gamma_2(k\eta_2), \dots, \gamma_p(k\eta_p))$, с F_0 гурвицевой матрицей и (F_0, G_0) управляемой, управление v_1 выбирается в виде:

$$v_1 = -k\bar{e}. \quad (54)$$

Выражения $\gamma_i(\cdot)$ определяются следующим фундаментальным результатом. Выбраны $d \geq 2n_w + 2$. Тогда, учитывая любую непрерывную функцию $\psi_0 : W \rightarrow \mathbb{R}$, существует вещественное число $\ell > 0$ и подмножество $S \subset \mathbb{C}$ нулевой меры Лебега, такой, что если собственные значения F_0 в $\{\lambda \in \mathbb{C} : \text{Re}[\lambda] \leq -\ell\} \setminus S$, то существует дифференцируемая функция $\sigma_0 : W \rightarrow \mathbb{R}^d$ и непрерывная ограниченная функция $\gamma_0 : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ такая, что

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_0}{\partial w} s(w) &= F_0 \sigma_0(w) + G_0 \psi_0(w) \\ \psi_0(w) &= \gamma_0(\sigma_0(w))\end{aligned}\quad (55)$$

для всех $w \in W$.

Функции $\gamma_1(\cdot), \dots, \gamma_p(\cdot)$, являются такими функциями, что для $i = 1, \dots, p$, тождества

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_i(w)}{\partial w} s(w) &= F_0 \sigma_i(w) - G_0 \psi_i(w) \\ -\psi_i(w) &= \gamma_i(\sigma_i(w))\end{aligned}\quad (56)$$

выполняются для некоторых $\sigma_i(w)$, где $\psi_i(w)$ это i -й элемент набора $\psi(w)$. Функции, определенные как

$$\bar{\sigma}_i(w) = \frac{1}{k} \sigma_i(w), \quad \bar{\gamma}_i(\eta_i) = \frac{1}{k} \gamma_i(k\eta_i), \quad \bar{\psi}_i(w) = \frac{1}{k} \psi_i(w)$$

удовлетворяют

$$\begin{aligned}\frac{\partial \bar{\sigma}_i(w)}{\partial w} s(w) &= F_0 \bar{\sigma}_i(w) - G_0 \bar{\psi}_i(w) \\ -\bar{\psi}_i(w) &= \bar{\gamma}_i(\bar{\sigma}_i(w)).\end{aligned}$$

Настройка

$$\begin{aligned}\bar{\gamma}(\eta) &= \text{col}(\bar{\gamma}_1(\eta_1), \bar{\gamma}_2(\eta_2), \dots, \bar{\gamma}_p(\eta_p)) \\ \bar{\sigma}(w) &= \text{col}(\bar{\sigma}_1(w), \bar{\sigma}_2(w), \dots, \bar{\sigma}_p(w)) \\ \bar{\psi}(w) &= \text{col}(\bar{\psi}_1(w), \bar{\psi}_2(w), \dots, \bar{\psi}_p(w))\end{aligned}$$

представлена как:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \bar{\sigma}(w)}{\partial w} s(w) &= F \bar{\sigma}(w) - G \bar{\psi}(w) \\ -\bar{\psi}(w) &= \bar{\gamma}(\bar{\sigma}(w)).\end{aligned}\quad (57)$$

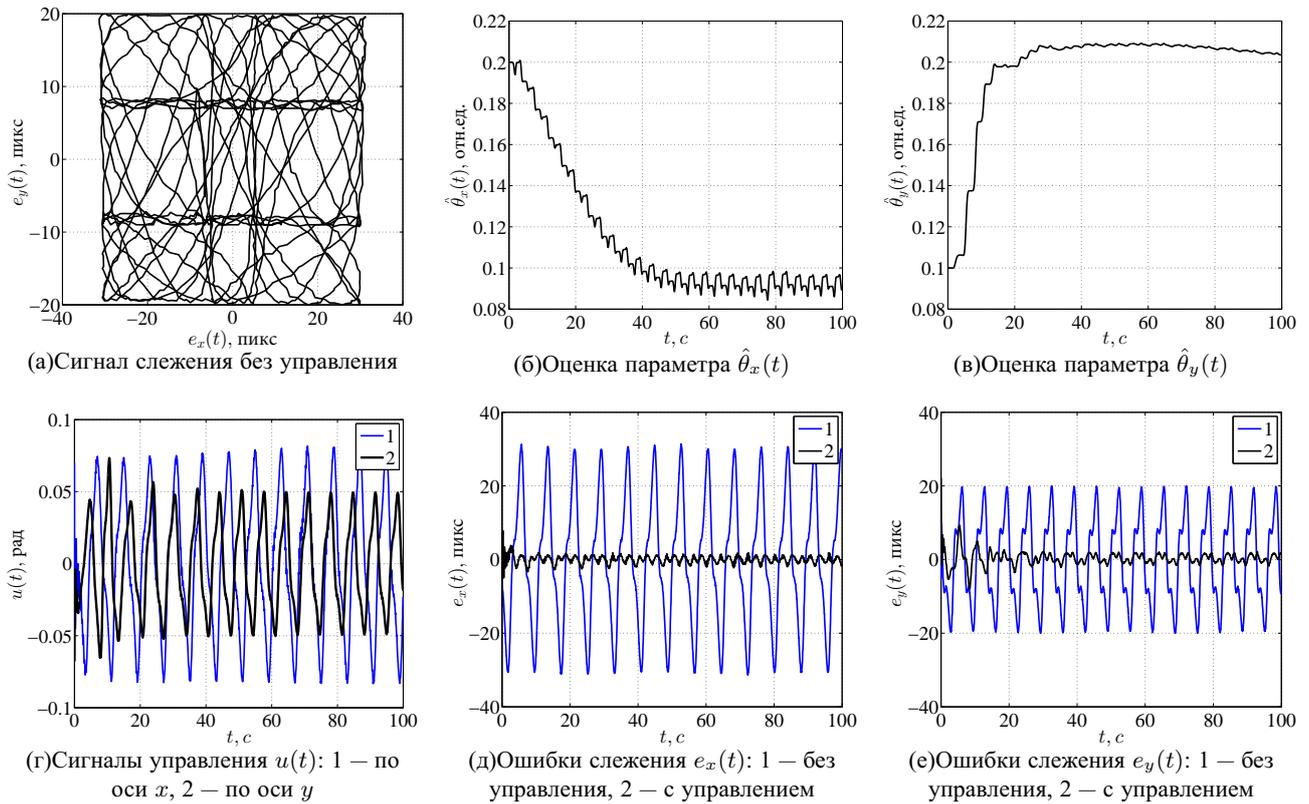


Рисунок 3 – Результаты экспериментального исследования следящей системы с нелинейным возмущением.

Экспериментальное исследование проводилось на установке, описанной в Главе 3. В эксперименте объект слежения двигался по закону, представляющему собой нелинейную функцию вдоль каждой из осей. На рисунке 3 показаны результаты экспериментальной апробации алгоритма компенсации нелинейных колебаний методом прямой адаптации с неизвестными параметрами возмущений θ_x и θ_y .

В заключении изложены итоги диссертационного исследования, перспективы дальнейшей разработки тематики.

Публикации по теме диссертации

1. Робототехническая следящая система с быстрой адаптацией к неизвестной траектории движения [Текст] / В.С. Громов, О.И. Борисов, А.А. Ведяков, С.В. Шаветов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2017. — Т. 60, № 9. — С. 832–839. — 0,5/0,31 п.л.
2. Быстрое оценивание параметров генератора хаотического сигнала [Текст] / В.С. Громов, А.А. Бобцов, О.И. Борисов, А.А. Пыркин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2017. — Т. 60, № 6. — С. 487–494. — 0,5/0,314 п.л.
3. Компенсация полигармонического возмущения, действующего на состояние и выход линейного объекта с запаздыванием в канале управления [Текст] / В.С. Громов, А.А. Пыркин, А.А. Бобцов [и др.] // Автоматика и телемеханика. — 2015. — Т. 12. — С. 43–64. — 1,375/0,715 п.л.
4. Система технического зрения для роботизированного макета надводного судна [Текст] / В.С. Громов, С.М. Власов, О.И. Борисов, А.А. Пыркин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2016. — Т. 16, № 4. — С. 749–752. — 0,25/0,139 п.л.

5. Алгоритмы адаптивного и робастного управления по выходу роботизированным макетом надводного судна [Текст] / В.С. Громов, С.М. Власов, О.И. Борисов [и др.] // Мехатроника, Автоматизация, Управление. — 2016. — Т. 17, № 1. — С. 18–25. — 0,5/0,305 п.л.
6. Управление квадрокоптером с компенсацией ветровых возмущений [Текст] / В.С. Громов, И.В. Петраневский, О.И. Борисов, А.А. Пыркин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2015. — Т. 15, № 6. — С. 1045–1053. — 0,563/0,39 п.л.
7. Робастная система динамического позиционирования для роботизированного макета надводного судна [Текст] / В.С. Громов, С.М. Власов, О.И. Борисов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2015. — Т. 58, № 9. — С. 713–719. — 0,438/0,304 п.л.
8. Система и алгоритмы стабилизации болбота [Текст] / В.С. Громов, А.С. Боргуль, К.А. Зименко, С.Ю. Маклашевич // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2011. — Т. 75, № 5. — С. 58–63. — 0,375/0,2 п.л.
9. Compensation of polyharmonic disturbance of state and output of a linear plant with delay in the control channel [Text] / V.S. Gromov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov [et al.] // Automation and Remote Control. — 2015. — Vol. 76, no. 12. — P. 2124–2142. — 1,188/0,825 п.л.
10. Stabilization of linear plants with unknown delay and sinusoidal disturbance compensation [Text] / V.S. Gromov, O.I. Borisov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov // 24th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2016. — 2016. — P. 426–430. — 0,313/0,217 п.л.
11. Adaptive Multisinusoidal Signal Tracking System with Input Delay [Text] / V.S. Gromov, O.I. Borisov, A.A. Vedyakov [et al.] // IFAC-PapersOnLine. — 2016. — Vol. 49, no. 13. — P. 105–110. — 0,375/0,224 п.л.
12. Output adaptive controller for linear system with input delay and multisinusoidal disturbance [Text] / V.S. Gromov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov [et al.] // 2014 IEEE Conference on Control Applications, CCA 2014. — 2014. — P. 1777–1782. — 0,375/0,248 п.л.
13. Adaptive controller for linear plant with parametric uncertainties, input delay and unknown disturbance [Text] / V.S. Gromov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov [et al.] // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). — 2014. — Vol. 19. — P. 11294–11298. — 0,313/0,166 п.л.
14. Stabilization of nonlinear system with input delay and biased sinusoidal disturbance [Text] / V.S. Gromov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov [et al.] // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). — 2014. — Vol. 19. — P. 12104–12109. — 0,375/0,22 п.л.
15. Fast compensation of unknown multiharmonic disturbance for nonlinear plant with input delay [Text] / V.S. Gromov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov [et al.] // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). — 2013. — Vol. 11, no. PART. — P. 546–551. — 0,375/0,257 п.л.
16. Hybrid output controller for parametrically uncertain systems with matching harmonic disturbances rejection [Text] / V. Gromov, A. Bobtsov, S. Kolyubin, A. Pyrkin // 2014 22nd Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2014. — 2014. — P. 91–96. — 0,375/0,247 п.л.
17. Simple Robust and Adaptive Tracking Control for Mobile Robots [Text] / V.S. Gromov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov [et al.] // IFAC-PapersOnLine. — 2015. — Vol. 48, no. 11. — P. 143–149. — 0,438/0,304 п.л.
18. Simple output stabilization approach for robotic systems [Text] / V.S. Gromov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov [et al.] // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). — 2013. — P. 1873–1878. — 0,375/0,237 п.л.
19. Human-free robotic automation of industrial operations [Text] / V.S. Gromov, O.I. Borisov, S.A. Kolyubin [et al.] // IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference). — 2016. — P. 6867–6872. — 0,375/0,191 п.л.

20. Manipulation Tasks in Robotics Education [Text] / V.S. Gromov, O.I. Borisov, A.A. Pyrkin [et al.] // IFAC-PapersOnLine. — 2016. — Vol. 49, no. 6. — P. 22–27. — 0,375/0,252 п.л.
21. Gromov, V.S. Control of multi-machine power systems with constant communication time-delay [Text] / V.S. Gromov, I.B. Furtat // 24th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2016. — 2016. — P. 883–888. — 0,375/0,258 п.л.
22. Simple adaptive control for quadcopters with saturated actuators [Text] / V.S. Gromov, O.I. Borisov, A.A. Bobtsov, A.A. Pyrkin // AIP Conference Proceedings. — 2017. — Vol. 1798. — 0,375/0,225 п.л.
23. Output robust control with anti-windup compensation for robotic boat [Text] / V.S. Gromov, O.I. Borisov, A.A. Pyrkin [et al.] // 2016 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR 2016. — 2016. — P. 13–18. — 0,375/0,239 п.л.
24. Robotic Boat Setup for Control Research and Education [Text] / V.S. Gromov, O.I. Borisov, A.A. Pyrkin [et al.] // IFAC-PapersOnLine. — 2016. — Vol. 49, no. 6. — P. 256–261. — 0,375/0,245 п.л.
25. Output Robust Control with Anti-Windup Compensation for Quadcopters [Text] / V.S. Gromov, O.I. Borisov, A.A. Pyrkin [et al.] // IFAC-PapersOnLine. — 2016. — Vol. 49, no. 13. — P. 287–292. — 0,375/0,244 п.л.
26. Adaptive controller implementation for surface robotic vessel [Text] / V. Gromov, J. Wang, O. Borisov [et al.] // Chinese Control Conference, CCC. — 2015. — Vol. 2015-September. — P. 3230–3235. — 0,375/0,217 п.л.
27. Output Control Algorithms of Dynamic Positioning and Disturbance Rejection for Robotic Vessel [Text] / V.S. Gromov, J. Wang, A.A. Pyrkin [et al.] // IFAC-PapersOnLine. — 2015. — Vol. 48, no. 11. — P. 295–300. — 0,375/0,237 п.л.
28. Output controller for quadcopters based on mathematical model decomposition [Text] / V.S. Gromov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov [et al.] // 2014 22nd Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2014. — 2014. — P. 1281–1286. — 0,375/0,201 п.л.
29. Output controller for quadcopters with wind disturbance cancellation [Text] / V.S. Gromov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov [et al.] // 2014 IEEE Conference on Control Applications, CCA 2014. — 2014. — P. 166–170. — 0,313/0,201 п.л.
30. Dynamic positioning system for nonlinear MIMO plants and surface robotic vessel [Text] / V.S. Gromov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov [et al.] // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). — 2013. — P. 1867–1872. — 0,375/0,19 п.л.
31. Experimental Study on Robust Output Control for Quadcopters [Text] / V.S. Gromov, O.I. Borisov, S.I. Tomashevich [et al.] // 25th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2017. — 2017. — P. 1029–1034. — 0,375/0,233 п.л.
32. Adaptive Tracking of a Multi-Sinusoidal Signal with DREM-Based Parameters Estimation [Text] / V.S. Gromov, O.I. Borisov, A.A. Vedyakov [et al.] // IFAC-PapersOnLine. — 2017. — P. 4366–4371. — 0,375/0,244 п.л.
33. The DREM Approach for Chaotic Oscillators Parameter Estimation with Improved Performance [Text] / V.S. Gromov, O.I. Borisov, A.A. Pyrkin [et al.] // IFAC-PapersOnLine. — 2017. — P. 7288–7292. — 0,313/0,22 п.л.
34. Громов, В.С. Методы управления робототехническими приложениями. Учебное пособие [Текст] / В.С. Громов, О.И. Борисов, А.А. Пыркин. — СПб : Университет ИТМО, 2016. — С. 108. — 3,875/2,325 п.л.
35. Громов, В.С. Программа для управления роботизированным макетом надводного судна [Текст]. — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014661674 от 11.11.2014 — 0,063/0,045 п.л.
36. Громов, В.С. Программа для управления робототехнической системой в условиях мультигармонических возмущений [Текст]. — Свидетельство о

государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615898 от 27.05.2015 — 0,063/0,045 п.л.

37. Громов, В.С. Программа для управления робототехнической системой посредством силомоментного датчика [Текст]. — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016619315 от 17.08.2016 — 0,063/0,045 п.л.
38. Громов, В.С. Программа для поиска и определения координат объекта манипулирования робототехнической системы [Текст]. — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016619488 от 22.08.2016 — 0,063/0,045 п.л.