

На правах рукописи



ДАНГ Тхи Фук

**СИНТЕЗ ИДЕНТИФИКАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ  
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ  
МЕТОДОМ СЕТЕВОГО ОПЕРАТОРА**

Специальность 05.13.01 Системный анализ, управление и обработка  
информации (промышленность)

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

МОСКВА – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов» (РУДН)

Научный  
руководитель:

Софронова Елена Анатольевна  
кандидат технических наук, доцент, старший  
научный сотрудник, ФГУ «Федеральный  
исследовательский центр «Информатика и  
управление» Российской академии наук»,  
г. Москва

Официальные оппоненты:

Скобцов Юрий Александрович, доктор  
технических наук, профессор, Санкт-  
Петербургский политехнический университет  
Петра Великого, г. Санкт-Петербург

Никульчев Евгений Витальевич, доктор  
технических наук, профессор, НОУ ВО  
«Московский технологический институт»,  
г. Москва

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Московский государственный  
технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»,  
г. Москва

Защита состоится «30» января 2018 г. в 14-00 часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.271.05 при ФГБОУ ВО «Тульский государственный  
университет», по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, 12-105.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский  
государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92 и на  
сайте <http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-05/dang-tf/>

Автореферат разослан «04» декабря 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



М.Ю. Соколова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Настоящая работа посвящена решению задачи синтеза идентификационного управления. Данная проблема возникает в тех случаях, когда необходимо решить задачу синтеза системы управления для объекта, математическая модель которого слишком сложна или полностью неизвестна. В качестве объектов управления выбраны робототехнические комплексы. В настоящее время уровень производства робототехнических комплексов для промышленности, космической отрасли, медицины и т.п. очень высок. Новые модели, имеющие большое число степеней свободы или широкие возможности модифицирования, появляются практически каждый месяц. Соответственно, математические модели таких робототехнических устройств сложны и требуют больших временных затрат на вывод.

В диссертации используется новый метод, метод сетевого оператора. Данный метод относится к классу методов символьной регрессии и по некоторым показателям существенно превосходит другие известные методы. Метод сетевого оператора позволяет кодировать математическое выражение в форме целочисленной матрицы. Основным преимуществом метода является использование принципа малых вариаций базисного решения. Принцип заключается в том, что исследователь задает одно базисное решение, а эволюционный алгоритм ищет оптимальное решение на множестве вариаций заданного базисного решения. Такой подход позволяет построить множество возможных решений, в котором большинство функций удовлетворяет условию достижения цели управления. Принцип малых вариаций также сокращает область поиска, ограничиваясь окрестностью базисного решения.

В диссертации для решения задачи синтеза идентификационного управления разработан двухэтапный численный метод сетевого оператора. Первоначально для решения задачи идентификации задается размерность идентифицируемой системы и находятся правые части ОДУ математической модели исследуемого объекта управления. Далее для выбранного исследователем решения решается задача синтеза управления.

Применение метода сетевого оператора как для этапа идентификации математической модели объекта, так и для этапа синтеза управления осуществляется впервые и является новым.

Данный метод применен для решения проблемы автоматизированной идентификации математических моделей сложных робототехнических комплексов и синтеза управления для таких объектов не решена, хотя имеет важное прикладное значение.

**Предметом диссертационного исследования** является применение одного из методов символьной регрессии, метода сетевого оператора, для решения задачи синтеза идентификационного управления. Метод сетевого оператора применяется на этапе идентификации математической модели и на этапе синтеза управления.

**Объектом диссертационного исследования** является система автоматического управления робототехническим комплексом, математическая модель которого предположительно сложна или полностью неизвестна.

**Объектом управления** является программируемый робототехнический комплекс, в частности мобильный робот или робот-манипулятор. Предполагается, что при динамике объекта управления возможно получить экспериментальные данные, которые будут использованы для решения задачи идентификации математической модели.

**Методы исследования** в диссертационной работе относятся к экспериментально-теоретическому уровню и включают: синтез, моделирование и эксперимент. Для решения задачи синтеза идентификационного управления применяется двухэтапный численный метод решения, метод сетевого оператора, полученные решения исследуются с помощью моделирования и эксперимента.

**Целью** диссертационного исследования является повышение качества системы управления робототехническими комплексами за счет автоматизации этапов идентификации и синтеза управления для объектов управления, математическая модель которых заранее неизвестна.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- разработать численный метод символьной регрессии, метод сетевого оператора, для синтеза идентификационного управления. Решить прикладные задачи синтеза идентификационного управления для моделей робота-манипулятора и мобильного робота с использованием разработанного двухэтапного метода сетевого оператора;
- разработать методику для синтеза идентификационного управления робототехническим комплексом и критерии оценки применимости результатов синтеза идентификационного управления на основе прикладной реализации синтезированного управления и исследования результатов экспериментов.
- разработать комплекс программ для решения задач синтеза идентификационного управления робототехническими комплексами.

**Научная новизна работы.** В рамках диссертации получены следующие основные научные результаты:

- Разработан численный метод сетевого оператора для решения задачи идентификационного управления. Ранее метод сетевого оператора использовался отдельно для решения задачи синтеза управления и решения задачи идентификации. Новый двухэтапный метод решает задачу синтеза управления методом сетевого оператора для математической модели объекта, полученной на этапе идентификации также методом сетевого оператора. Разработанный в диссертации численный метод сетевого оператора является новым, так как предназначен для решения новой задачи синтеза идентификационного управления. Решены прикладные задачи синтеза идентификационного управления робототехническими комплексами, роботом-манипулятором и мобильным роботом;
- Разработана методика для синтеза идентификационного управления робототехническим комплексом, которая заключается в проведении натурального эксперимента, использующего управление в форме функций, обеспечивающих выявление динамических свойств объекта. Разработаны критерии применимости результатов синтеза идентификационного управления на основе экспериментального исследования синтезированной системы управления.

**Положения, выносимые на защиту.** На защиту выносятся следующие результаты:

- Численный метод сетевого оператора для решения задачи синтеза идентификационного управления робототехническими комплексами;
- Методика для синтеза идентификационного управления робототехническими комплексами и критерии оценки применимости результатов синтеза идентификационного управления.

**Степень разработанности диссертационных исследований** определена тем, что все разработанные в процессе исследования методы, алгоритмы и методики доведены до программной реализации, а результаты моделирования апробированы на реальном объекте управления, мобильном роботе.

**Практическая значимость результатов** работы заключается в том, что решенная задача синтеза идентификационного управления предназначена для построения систем управления на основе экспериментальных данных в условиях, когда математическая модель объекта управления сложна или полностью неизвестна. В диссертации приведены два примера синтеза идентификационного управления: для эталонной модели робота - манипулятора и реального мобильного робота. На основе разработанных алгоритмов созданы программные комплексы для задачи идентификации математической модели объекта и задачи синтеза системы управления. Разработанный в диссертации метод может быть использован при идентификации математических моделей, проектировании и эксплуатации систем управления сложными техническими объектами.

**Теоретическая значимость** диссертационной работы заключается в формализации задачи синтеза идентификационного управления на основе постановок двух задач, задачи идентификации математической модели объекта управления и задачи синтеза системы управления. В диссертации приведено исследование качества системы управления,

полученной в результате решения задачи синтеза идентификационного управления методом сетевого оператора.

**Связь темы исследования с научными программами.** Работа выполнена на кафедре кибернетики и мехатроники РУДН в рамках следующих проектов:

- грант РФФИ «Исследование и разработка численного метода идентификации моделей интеллектуальных систем управления» (№13-08-00523);
- грант РФФИ «Исследование методов синтеза систем управления в условиях неопределенности» (№ 14-08-00008).

**Достоверность** полученных в диссертации методик и алгоритмов подтверждается их программной реализацией, а также вычислительными и натурными экспериментами, проводимыми в процессе решения задачи синтеза идентификационного управления.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертации представлялись, обсуждались и были приняты на научном семинаре кафедры кибернетики и мехатроники ФГАОУ ВО Российского университета дружбы народов.

Полученные в диссертации результаты докладывались на следующих научных конференциях и международных симпозиумах: 11th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2016) (г. Хэфей, Китай), 10th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2015) (г. Окленд, Новая Зеландия), VIII Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2015), VIII Международной научно-практической конференции «Инженерные системы – 2015» (г. Москва, 2015), XI Международном симпозиуме «Интеллектуальные системы» (INTELS'2014) (г. Москва, 2014), VII Международной научно-практической конференции «Инженерные системы – 2014» (г. Москва, 2014).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 11 печатных работах, в том числе в 4 статьях в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, и в 2 статьях в трудах международных конференций, включенных в базы цитирования SCOPUS и Web of Science.

**Личный вклад.** Все исследования и эксперименты, результаты которых приведены в диссертации, получены лично соискателем или при его непосредственном участии. Во всех необходимых случаях заимствования чужих результатов в диссертации приведены ссылки на литературные источники.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и основных выводов по работе, списка литературы из 95 наименований и двух приложений. Общий объем работы составляет 185 страниц, включая 52 рисунка и 13 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы предмет, цели и задачи исследования, методы исследования, новизна научных результатов и практическая значимость полученных результатов, положения, выносимые на защиту, приведены данные об апробации работы, структуре и объеме диссертации.

**В первой главе** приведен обзор аналитических и численных методов для решения задач идентификации математической модели и синтеза управления. Указано, что появившиеся в конце XX века методы символьной регрессии позволяют находить с помощью эволюционных алгоритмов структуру и параметры математического выражения, поэтому эти методы целесообразно использовать для численного решения задачи синтеза идентификационного управления.

На основе обзора существующей литературы приведена постановка задачи синтеза идентификационного управления.

Математическую модель объекта управления предложено формировать по экспериментальным данным. В качестве критерия решения задачи используются нормы отклонений выходных переменных модели от экспериментальных данных. Решением задачи идентификации является модель в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Решением задачи синтеза является функция, описывающая зависимость управления от координат пространства состояний

идентифицированной модели. Управление должно обеспечивать достижение к цели управления с оптимальным значением заданного критерия качества.

Проведена формальная постановка задачи идентификации объекта управления и синтеза управления.

Для решения **задачи идентификации** считаем, что нам известны размерность  $n$  модели объекта управления и размерность  $m$  вектора управления, причем  $m \leq n$ , а экспериментальные данные определены в виде упорядоченного множества значений пар векторов в дискретные моменты времени

$$\Xi = ((\tilde{\mathbf{u}}(t_0), \tilde{\mathbf{x}}(t_0)), \dots, (\tilde{\mathbf{u}}(t_N), \tilde{\mathbf{x}}(t_N))), \quad (1)$$

где  $\tilde{\mathbf{u}}(t_i)$  – заданное значение вектора управления в момент  $t_i$ ,  $\tilde{\mathbf{u}}(t_i) = [\tilde{u}_1(t_i) \dots \tilde{u}_m(t_i)]^T$ ,  $\tilde{\mathbf{x}}(t_i)$  – измеренное значение вектора состояния объекта управления в момент  $t_i$ ,  $\tilde{\mathbf{x}}(t_i) = [\tilde{x}_1(t_i) \dots \tilde{x}_n(t_i)]^T$ ,  $i = \overline{0, N}$ .

Задача заключается в построении математической модели в форме системы обыкновенных уравнений

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad (2)$$

где  $\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = [g_1(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \dots g_n(\mathbf{x}, \mathbf{u})]^T$  – искомые математические выражения.

Решение  $\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^0)$ ,  $\mathbf{x}^0 = \tilde{\mathbf{x}}(t_0)$ , системы уравнений (2) получено в виде

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}(t)),$$

где  $\mathbf{u}(t) = \tilde{\mathbf{u}}(t_j)$  при  $t \in [t_j, t_{j+1})$ ,  $j = \overline{0, N-1}$ , должно обеспечить минимум следующих критериев:

$$J_1 = \sqrt{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n \alpha_i (x_i(t_j) - \tilde{x}_i(t_j))^2} \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$J_2 = \max_{\substack{i \in \{1, \dots, n\}, \\ j \in \{0, \dots, N\}}} |\beta_i (x_i(t_j) - \tilde{x}_i(t_j))| \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  – заданные весовые коэффициенты,  $i = 1, \dots, n$ .

Показано, что данная задача относится к классу задач структурно-параметрической многокритериальной оптимизации. Решением задачи является множество Парето на пространстве критериев (3), (4).

**Задача синтеза** заключается в нахождении синтезирующей функции, при которой система удовлетворяла бы требуемым показателям качества и ограничениям.

В задаче синтеза управления задана модель объекта управления в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad (5)$$

где  $\mathbf{x}$  – вектор состояния объекта управления,  $\mathbf{u}$  – вектор управления,  $\mathbf{x} = [x_1 \dots x_n]^T$ ,  $\mathbf{u} = [u_1 \dots u_m]^T$ .

Задана область начальных условий

$$\mathbf{x}(t_0) \in X_0 \subseteq \mathbb{R}^n. \quad (6)$$

Заданы ограничения на управление

$$\mathbf{u} \in U \subseteq \mathbb{R}^m. \quad (7)$$

Заданы терминальные условия в виде  $n-l$  мерного многообразия

$$\varphi_i(\mathbf{x}(t_f)) = 0, \quad i = 1, \dots, l, \quad t_f \leq t^+, \quad (8)$$

где  $t_f$  – время достижения терминальных условий (8) из области начальных условий (6),

$t^+$  – заданное предельное время процесса управления.

Задан критерий качества управления

$$J = \int_{t_0}^{t_f} f_0(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt \rightarrow \min. \quad (9)$$

Вектор управления предложено искать в виде

$$\mathbf{u} = \mathbf{h}(\mathbf{x}), \quad (10)$$

где  $\mathbf{h}(\mathbf{x})$  – многомерная функция, допускающая включение точек разрыва первого рода и обеспечивающая отображение пространства векторов состояния в пространство векторов управления,  $\mathbf{h}(\mathbf{x}) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ .

Функция  $\mathbf{h}(\mathbf{x})$  должна удовлетворять следующему требованию:  $\forall \mathbf{x}^0 \in X_0$  решение  $\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^0)$  системы дифференциальных уравнений  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{h}(\mathbf{x}))$  обеспечивает выполнение условий:

а)  $\mathbf{h}(\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^0)) \in U$ ;

б)  $\forall t_f \leq t^+ \quad \varphi_i(\mathbf{x}(t_f, \mathbf{x}^0)) = 0, \quad i = 1, \dots, l$ ;

в)  $\int_{t_0}^{t_f} f_0(\mathbf{x}(t), \mathbf{h}(\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^0))) dt = \min_{\forall \tilde{\mathbf{u}} \in U} \int_{t_0}^{t_f} f_0(\mathbf{x}(t), \tilde{\mathbf{u}}(t)) dt$ , где  $\tilde{\mathbf{u}}(t)$  – любое допустимое

управление, обеспечивающее выполнение терминальных условий (8) и удовлетворяющее ограничениям (7).

**Во второй главе** разработан двухэтапный метод сетевого оператора и генетический алгоритм для решения задачи синтеза идентификационного управления, который позволяет строить математические выражения в виде сетевых операторов.

Сетевой оператор является ориентированным графом  $G(V, C, X, Q, O_1, O_2)$ , где  $V = (1, \dots, L)$  – множество узлов,  $C = ((i_1, j_1), \dots, (i_M, j_M))$  – множество упорядоченных пар узлов,  $i_r, j_r \in V$ ,  $X = (x_1, \dots, x_n)$  – множество переменных,  $Q = (q_1, \dots, q_l)$  – множество параметров,  $O_1 = (\rho_1(z), \rho_2(z), \dots, \rho_W(z))$  – множество унарных операций,  $O_2 = (\chi_1(z', z''), \chi_2(z', z''), \dots, \chi_V(z', z''))$  – множество бинарных операций. Каждый сетевой оператор соответствует определенному математическому выражению. Для представления сетевого оператора в ЭВМ использована матрица сетевого оператора. Матрица сетевого оператора является целочисленной матрицей верхнего треугольного вида. Диагональные элементы матрицы содержат номера бинарных операций, а недиагональные элементы – нули или номера унарных операций. Размерность матрицы сетевого оператора определяется количеством узлов в графе.

Вычисление математических выражений по сетевому оператору не требует анализа символов строк. Представление сетевого оператора в виде матрицы позволяет выполнять вычисления достаточно быстро. Сетевой оператор целесообразно использовать при решении задач синтеза систем управления, идентификации, аппроксимации и др., где необходимо найти математическое выражение.

При использовании метода сетевого оператора для поиска оптимального математического выражения в задачах синтеза систем управления, идентификации или аппроксимации с помощью генетического алгоритма использован универсальный принцип базисного решения. Использование базисного решения позволяет организовать поиск оптимального решения в выбранной окрестности.

Для генерации новых решений на основе принципа базисного решения предложено изменять граф сетевого оператора (вариация сетевого оператора). Для этого в памяти вычислительной машины сетевой оператор представляется в виде матрицы  $\Psi$ . Вектор вариаций записывается как действие оператора на матрицу сетевого оператора

$$\tilde{\Psi} = \mathbf{w} \circ \Psi,$$

где  $\tilde{\Psi}$  – матрица сетевого оператора после вариации,  $\mathbf{w}$  – вектор вариаций,  $\Psi$  – матрица сетевого оператора до вариации. Для каждого сетевого оператора получается матрица  $\Psi^i$  в результате вариации базисного сетевого оператора  $\Psi^0$ .

При поиске оптимального решения, закодированного в виде матрицы сетевого оператора, используется вариационный генетический алгоритм, который отличается от «классического» генетического алгоритма тем, что основные операции скрещивания и мутации выполняются не на коде математического выражения, а на векторе вариаций. При решении обеих задач идентификации и синтеза используем вариационный генетический алгоритм многокритериальной оптимизации.

**В третьей главе** приведены две практических реализации задачи синтеза идентификационного управления:

В первой практической реализации решена задача синтеза идентификационного управления *роботом-манипулятором*. Считалось, что математическая модель объекта управления неизвестна, а заданы только экспериментальные данные, хотя сами эксперименты были проведены в результате моделирования эталонной модели.

При решении *задачи идентификации*, в эксперименте для получения исходных данных задали управление роботом с помощью тестовых функций времени:

$$\tilde{\mathbf{u}}(t) = [\tilde{u}_1(t) \quad \tilde{u}_2(t) \quad \tilde{u}_3(t)]^T, \quad (11)$$

где  $\tilde{u}_1(t) = -0.3 \sin(t)$ ,  $\tilde{u}_2(t) = 0.1(10 - t)$ ,  $\tilde{u}_3(t) = 0.4 \cos(t)$ .

При решении задачи идентификации считали, что нам известны размерность модели объекта управления,  $n = 3$ , и размерность вектора управления,  $m = 3$ .

Экспериментальные данные были получены в 101-й точке. Задачу идентификации решали методом сетевого оператора и получили следующее решение:

$$\dot{x}_1 = u_1^3 + u_1^3 + u_3^3 + q_1 u_2^2 + u_1 q_4 \cos(u_3), \quad (12)$$

$$\dot{x}_2 = x_1 - x_1^3 + -q_3 + q_1^3 + \cos(x_2) + q_2 + x_1 - x_1^3 + x_2 - x_2^3 + u_2 + q_5, \quad (13)$$

$$\dot{x}_3 = u_1 q_4 \cos(u_3) - (u_1 q_4 \cos(u_3))^3 + u_1^3 + u_3^3 + q_1 u_2^2 + u_1 q_4 \cos(u_3) - (u_1^3 + u_3^3 + q_1 u_2^2 + u_1 q_4 \cos(u_3))^3 - x_2^3 + x_2 + u_1^2 + \sin(\cos(x_1) \cos(x_2) \cos(x_3) q_3 u_2 + u_2^3 + u_3 + q_6 + \cos(x_1 - x_1^3 + x_2 - x_2^3 + u_2 + q_5)). \quad (14)$$

где  $q_1 = 0,234$ ,  $q_2 = 1,004$ ,  $q_3 = 3,84$ ,  $q_4 = 3,984$ ,  $q_5 = 0,494$ ,  $q_6 = 0$ .

На рисунке 1 представлены результаты моделирования полученной модели (12) – (14) с программным управлением (11) и экспериментальные данные. На рисунке кружками отмечены экспериментальные данные,  $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ , а сплошной линией – результаты моделирования,  $\mathbf{x}(t)$ .

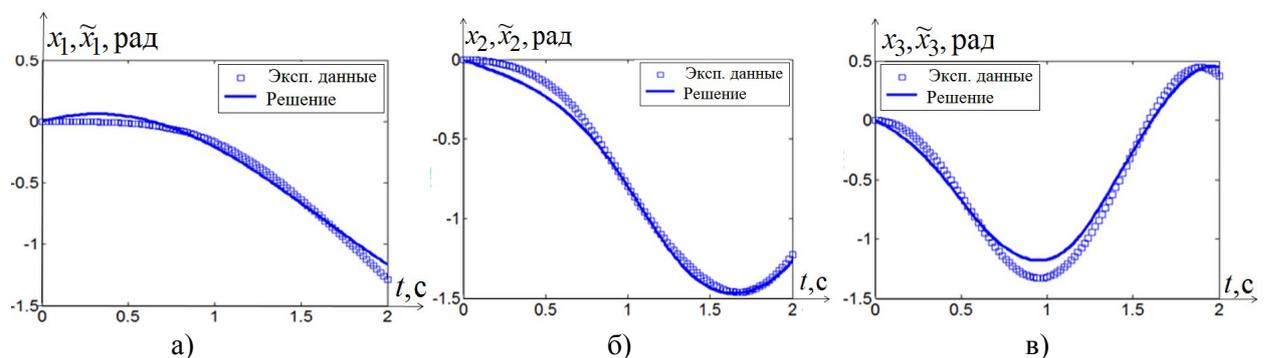


Рис. 1. Функции а –  $\tilde{x}_1(t)$  и  $x_1(t)$ , б –  $\tilde{x}_2(t)$  и  $x_2(t)$ , в –  $\tilde{x}_3(t)$  и  $x_3(t)$

Как видно из графиков, решение, полученное в результате идентификации математической модели, достаточно хорошо соответствует результатам экспериментов. Значения функционалов качества составили  $J_1 = 20,261$ ,  $J_2 = 0,284$ .

При решении *задачи синтеза* управления для полученной на этапе идентификации модели (12)–(14).

Рассматривали разные начальные положения звеньев робота  $\mathbf{x}^{0,1} = [-0,1 \ -0,2 \ -0,1]^T$ ,  $\mathbf{x}^{0,2} = [0,1 \ 0,2 \ 0,1]^T$ ,  $\mathbf{x}^{0,3} = [0 \ 0 \ 0]^T$ , начальное время из диапазона от 0,5 до 10 с, траектория движения была задана в пространстве. В результате синтеза системы управления методом сетевого оператора было получено следующее решение:

$$\bar{u}_i = \begin{cases} u_i^-, & \text{если } y_i \leq u_i^- \\ u_i^+, & \text{если } y_i \geq u_i^+ \\ y_i, & \text{иначе} \end{cases}$$

$$y_1 = (q_1' \sin(\Delta x_1) - (q_1' \sin(\Delta x_1))^3)^3 + (q_2' + \sin(\Delta x_2))^3 + q_1' \sin(\Delta x_1) - (q_1' \sin(\Delta x_1))^3 + (q_1' \sin(\Delta x_1))^2 - \Delta x_2 + q_2' + \sin(\Delta x_2) + ((q_2' + \sin(\Delta x_2))^3 + q_1' \sin(\Delta x_1) - (q_1' \sin(\Delta x_1))^3)^2 - (-\Delta x_2 + (q_1' \sin(\Delta x_1))^2 + ((q_2' + \sin(\Delta x_2))^3 + q_1' \sin(\Delta x_1) - (q_1' \sin(\Delta x_1))^3)^2 + q_2' + \sin(\Delta x_2))^3 - \Delta x_2 (q_2' + \sin(\Delta x_2)), \quad (15)$$

$$y_2 = q_1' + \cos(-\Delta x_2 (q_2' + \sin(\Delta x_2))), \quad (16)$$

$$y_3 = (q_1' \sin(\Delta x_1))^2 + q_3' \sin(\Delta x_3) - (q_3' \sin(\Delta x_3))^3 - \Delta x_2 + (q_1' \sin(\Delta x_1))^2 + q_2' + \sin(\Delta x_2) + q_1' \sin(\Delta x_1) + ((q_2' + \sin(\Delta x_2))^3 - (q_1' \sin(\Delta x_1))^3)^2 - (((q_2' + \sin(\Delta x_2))^3 + q_1' \sin(\Delta x_1) - (q_1' \sin(\Delta x_1))^3)^2)^3 + y_1^3 \quad (17)$$

где  $q_1' = 0,484$ ,  $q_2' = 0$ ,  $q_3' = 1,984$ .

На рисунке 2а приведены результаты моделирования полученной системы управления для трех начальных условий. Точками обозначена заданная траектория. Функционалы качества имели следующие значения  $J_1 = 12,603$ ,  $J_2 = 0,186$ .

Подставив полученное управление в эталонную математическую модель, получили результат, приведенный на рисунке 2б, где сплошной линией показан результат моделирования с эталонной математической моделью, курсивом – с моделью, полученной на этапе идентификации.

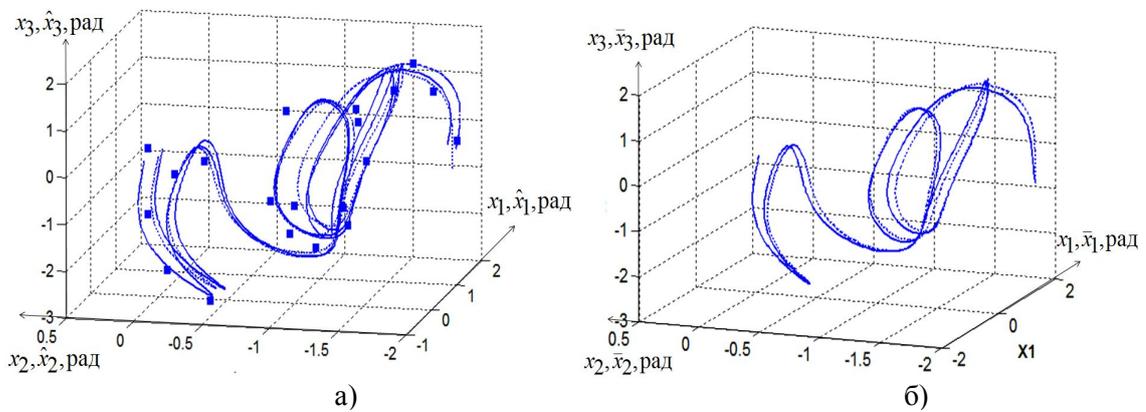


Рис. 2. а – Движение по заданной траектории из трех разных начальных условий, б – Функции  $\mathbf{x}(t)$  и  $\bar{\mathbf{x}}(t)$

Относительная погрешность для функций  $x_1(t)$  и  $\bar{x}_1(t)$  составила  $e_1 = 0,058$ , для функций  $x_2(t)$  и  $\bar{x}_2(t)$  -  $e_2 = 0,132$ , для функций  $x_3(t)$  и  $\bar{x}_3(t)$  -  $e_3 = 0,07$ .

Сравнив управление, синтезированное для эталонной математической модели с управлением, синтезированным для идентифицированной модели, получили следующий результат, изображенный на рисунке 3.

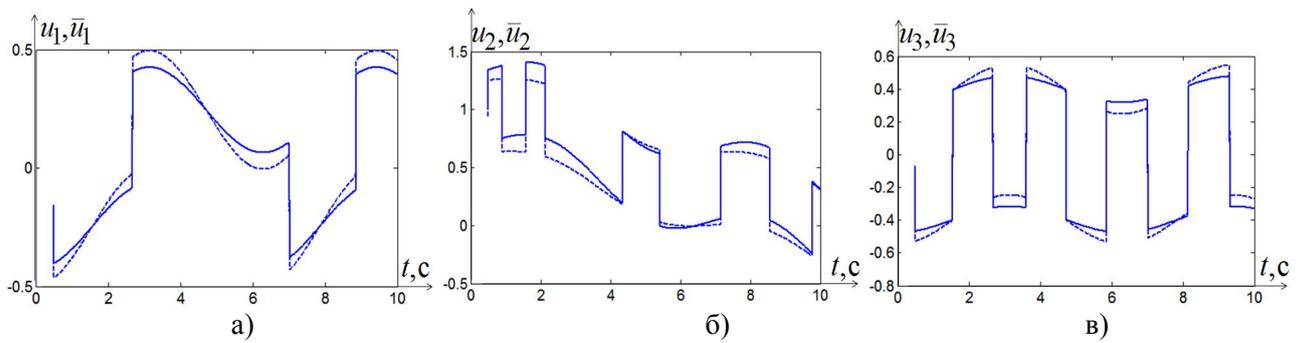


Рис. 3. Функции а –  $u_1(t)$  и  $\bar{u}_1(t)$ , б –  $u_2(t)$  и  $\bar{u}_2(t)$ , в –  $u_3(t)$  и  $\bar{u}_3(t)$  для разных начальных значений

В результате применения двухэтапного метода сетевого оператора была решена задача синтеза идентификационного управления для модели робота-манипулятора. Результаты вычислительных экспериментов с эталонной моделью робота показали удовлетворительное качество решения задач идентификации и синтеза системы управления.

Во второй практической реализации решена задача синтеза идентификационного управления роботом *LEGO Mindstorms NXT 2.0*, изображенного на рисунке 4. Робот имеет 4 колеса с радиусом  $R = 0,01$  м. Расстояния, пройденные колесами робота, рассчитывались по формулам  $x_1 = R\varphi_1$ ,  $x_3 = R\varphi_2$ , где  $x_1$ ,  $x_3$  – расстояния, пройденные, соответственно, левой и правой парами колес,  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  – углы вращения колес в радианах. При движении робота считали, что он инвариантен к положению на столе, и первоначальное положение определяет его инерциальные координаты. По умолчанию начальная точка имеет координаты равные нулю.



Рис. 4. Робот LEGO Mindstorms NXT 2.0

Для идентификации объекта, управление было задано в виде функций времени

$$u_1^* = [100 \operatorname{sgn}(t - 0.5)], \quad u_2^* = [100 \operatorname{sgn}(t - 0.8)], \quad (18)$$

где  $[a] = \begin{cases} \lfloor a \rfloor, & \text{если } \lfloor a \rfloor - a < 0.5 \\ \lceil a \rceil, & \text{иначе} \end{cases}$ .

Считали, что известны размерность модели объекта управления,  $n = 4$ , и размерность вектора управления,  $p = 2$ .

**Эксперимент 1.** Было проведено 10 экспериментов по 21 точке,  $N = 21$ . В каждой точке найдены средние значения  $\tilde{x}_1$  и  $\tilde{x}_3$  по всем экспериментам. Применяв метод сетевого оператора для решения задачи идентификации, получили модель системы управления:

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad (19)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{b(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{m}, \quad (20)$$

$$\dot{x}_3 = x_4, \quad (21)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{c(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{m}, \quad (22)$$

где

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T, \mathbf{u} = [u_1 \ u_2]^T, b(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \operatorname{sgn}(x_1)\sqrt{|x_1|} - x_2 + q_2 - q_2^3 + \cos(x_4) + a + \cos(d) +$$

$$+ (\operatorname{sgn}(x_1)\sqrt{|x_1|x_2q_2})^3 + \operatorname{sgn}(x_4q_4(q_5 - q_5^3))\sqrt{|x_4q_4(q_5 - q_5^3)|},$$

$$a = \cos(x_4) + \operatorname{sgn}(x_1)\sqrt{|x_1|}q_1 \cos(x_4)q_6^2 + \operatorname{sgn}(x_1)\sqrt{|x_1|x_2q_2} + \sqrt{q_1}x_3q_3 + x_4q_4(q_5 - q_5^3) + u_1q_5 +$$

$$+ u_2q_6, d = q_2 - q_2^3 + \operatorname{sgn}(x_4)\sqrt{|x_4|} + \cos(q_6) + \operatorname{sgn}(x_1)\sqrt{|x_1|}q_1 \cos(x_4)q_6^2 + \operatorname{sgn}(x_1)\sqrt{|x_1|x_2q_2} -$$

$$- (\operatorname{sgn}(x_1)\sqrt{|x_1|x_2q_2})^3 + \sqrt{q_1}x_3q_3 + x_4q_4(q_5 - q_5^3) + u_1q_5 + u_2q_6,$$

$$c(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \cos(x_1) + \cos(q_5) - \operatorname{sgn}(x_1)\sqrt{|x_1|x_2q_2} + \cos(\sqrt{q_1}x_3q_3) + \operatorname{sgn}(u_2q_6)\sqrt{|u_2q_6|} + d +$$

$$+ \operatorname{sgn}(b(\mathbf{x}, \mathbf{u}))\sqrt{|b(\mathbf{x}, \mathbf{u})|}, q_1 = 0,0469, q_2 = 3,984, q_3 = 3,984, q_4 = 3,75, q_5 = 2,25,$$

$$q_6 = 3,984.$$

**Эксперимент 2.** Было проведено 10 экспериментов по 51 точке,  $N = 51$ , и получена модель системы управления:

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad (23)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{b(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{m}, \quad (24)$$

$$\dot{x}_3 = x_4, \quad (25)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{c(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{m}, \quad (26)$$

где  $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T, \mathbf{u} = [u_1 \ u_2]^T, b(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \cos(x_3) + \sqrt{q_6} + a, a = \operatorname{sgn}(x_1)\sqrt{|x_1|} + x_3 +$   
 $+ \cos(x_4) + q_4 - q_4^3 + q_2x_1^2x_2 + q_3(q_4 - q_4^3) + x_4q_4(q_5 - q_5^3) + u_1q_5 \cos(q_3(q_4 - q_4^3)) + u_2q_6,$   
 $d = q_1^2 + \operatorname{sgn}(x_3)\sqrt{|x_3|} - q_3 + \operatorname{sgn}(x_4)\sqrt{|x_4|} + \cos(q_5) + a + \operatorname{sgn}(a)\sqrt{|a|}, c(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \cos(a) + d +$   
 $+ \cos(b(\mathbf{x}, \mathbf{u})), q_1 = 0,0156, q_2 = 0, q_3 = 1,984, q_4 = 2, q_5 = 2,437, q_6 = 1,984.$

Результаты моделирования полученных моделей систем управления в эксперименте 1 и эксперименте 2 представлены на рисунках 5 и 6. Точками отмечены экспериментальные данные, сплошной линией на рис. 5 – результаты, полученные по модели 1 (19)-(22), сплошной линией на рис. 6 – результаты, полученные по модели 2 (23)-(26).

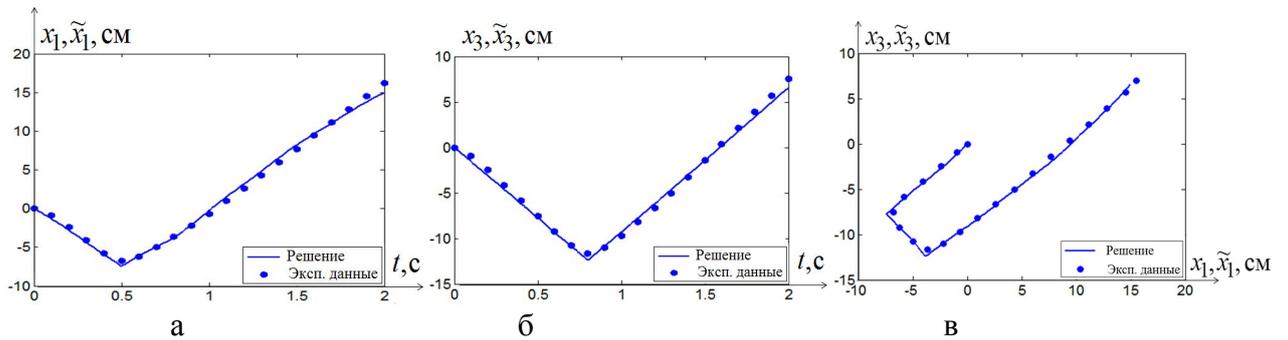


Рис. 5. а – Функции  $x_1(t)$  и  $\tilde{x}_1(t)$ , б – Функции  $x_3(t)$  и  $\tilde{x}_3(t)$ , в – Фазовая траектория  $x_3(x_1)$

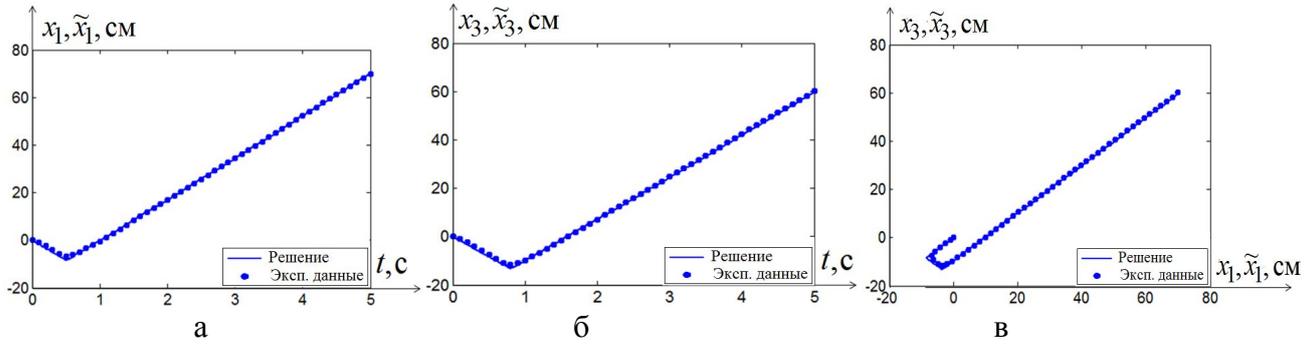


Рис. 6. а – Функции  $x_1(t)$  и  $\tilde{x}_1(t)$ , б – Функции  $x_3(t)$  и  $\tilde{x}_3(t)$ , в – Фазовая траектория  $x_3(x_1)$

В результате решения задачи идентификации при проведении экспериментов 1 и 2, с одинаковым видом управления, но разным временем моделирования, 2 и 5 секунд соответственно, были получены две модели объекта управления: модель 1 (19)–(22) и модель 2 (23)–(26). Модели имеют разную структуру, не совпадающую с моделью, построенной на основе физических законов. Обе модели достаточно сложны, но вычислительный эксперимент показал, что обе модели описывают движение робота, которое совпадает с экспериментальными данными. Функционалы качества для первой модели  $J_1 = 3,188$ ,  $J_2 = 1,163$ , а для второй модели –  $J_1 = 3,093$ ,  $J_2 = 1,106$ .

На втором этапе осуществили синтез системы управления с учетом полученной на этапе идентификации модели также с помощью метода сетевого оператора. Синтез систем управления для каждой из полученных двух моделей мобильного робота выполнили по двум разным траекториям.

**Эксперимент 3.** Задана траектория 1 в виде набора непрерывных функций времени

$$\hat{x}_1(t) = 35 \sin\left(\frac{2t}{5}\right), \hat{x}_2(t) = 14 \cos\left(\frac{2t}{5}\right), \hat{x}_3(t) = 10 \sin\left(\frac{\pi t}{2}\right), \hat{x}_4(t) = 5\pi \cos\left(\frac{\pi t}{2}\right). \quad (27)$$

Выбор траектории обусловлен габаритами рабочего стола для проведения эксперимента, а также длиной USB кабеля.

При применении метода сетевого оператора для решения задачи синтеза для модели (19) – (22), получили систему управления:

$$u_i = \begin{cases} \text{sgn}(y_i)100, & \text{если } |y_i| \geq 100 \\ y_i & \text{иначе} \end{cases}, \quad i = 1, 2. \quad (28)$$

где  $y_1 = -q_1' - x_4 q_4 + ((x_1 q_1) \cos(q_4) + x_4 q_4 - (x_4 q_4)^3)^3$ ,

$y_2 = \cos(x_2 q_2) + \text{sgn}(x_3) \sqrt{|x_3|} q_3 \cos(x_1 q_1 \cos(q_4)) + x_4 q_4 - (x_4 q_4)^3$ ,

$q_1' = 0,234$ ,  $q_2' = 1,984$ ,  $q_3' = 1,984$ ,  $q_4' = 0,047$ .

На рисунке 7 приведены результаты моделирования с полученной системой управления (28). Штрихпунктирной линией обозначены заданные траектории, а сплошной линией – полученное в результате автоматизированного синтеза решение. Значения функционалов качества составили  $J_1 = 0,728$ ,  $J_2 = 0,63$ .

Синтезированное управление (28) передали на реальный объект в виде векторов управлений в каждый момент времени, чтобы сравнить траекторию движения, полученную в результате синтеза идентификационного управления, с траекторией, по которой будет двигаться реальный робот. На рисунке 8 приведены заданная траектория (27), результаты моделирования системы (19)–(22) с управлением (28) и траектория движения реального объекта.

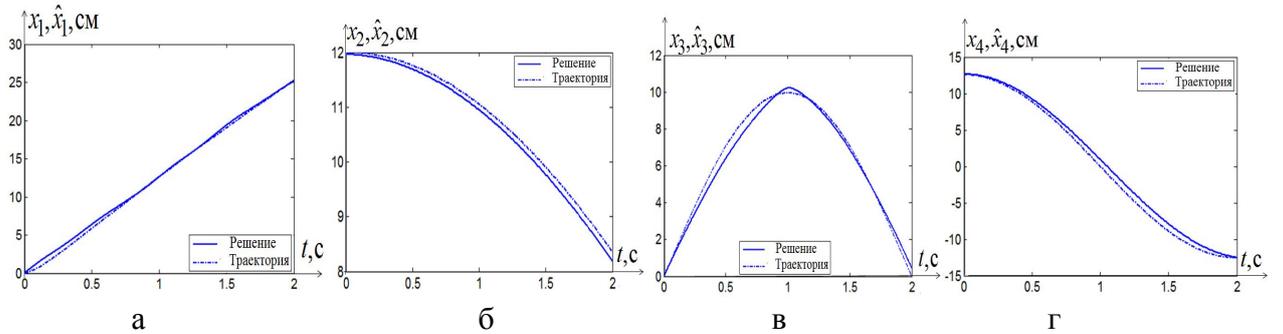


Рис. 7. Функции а –  $\hat{x}_1(t)$  и  $x_1(t)$ , б –  $\hat{x}_2(t)$  и  $x_2(t)$ , в –  $\hat{x}_3(t)$  и  $x_3(t)$ , г –  $\hat{x}_4(t)$  и  $x_4(t)$

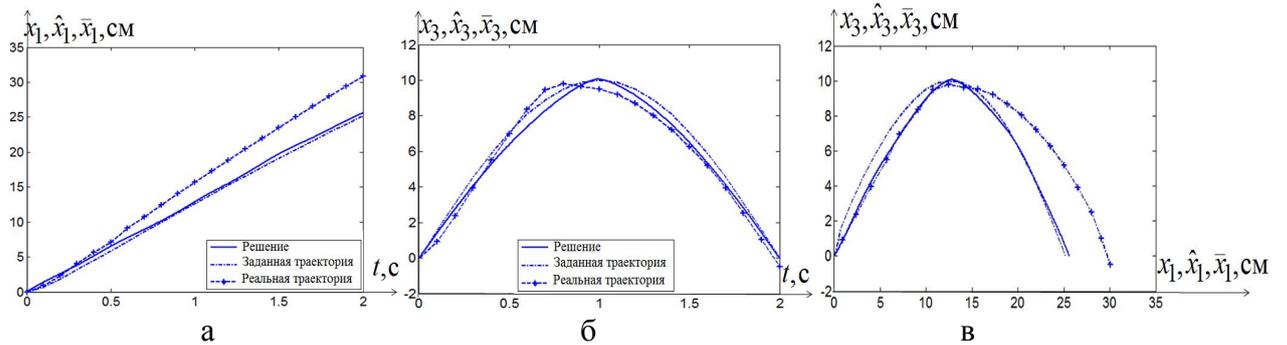


Рис. 8. а – Функции  $\hat{x}_1(t)$ ,  $x_1(t)$  и  $\bar{x}_1(t)$ , б – Функции  $\hat{x}_3(t)$ ,  $x_3(t)$  и  $\bar{x}_3(t)$ , в – Фазовые траектории  $x_3(x_1)$

При применении метода сетевого оператора для решения задачи синтеза для модели (23)–(26), получили модель системы управления:

$$u_i = \begin{cases} \text{sgn}(y_i)100, & \text{если } |y_i| \geq 100 \\ y_i & \text{иначе} \end{cases}, \quad i = 1, 2. \quad (29)$$

где  $y_1 = q_2'^2 - x_3 + x_4^3 - q_2'^2 x_3 q_3' \cos(x_2 q_2' q_4') + \cos(x_4 q_4' \cos(x_2 q_2' q_4')) + a^3$ ,

$y_2 = q_2' + x_4 q_4' \cos(x_2 q_2' q_4') - (x_4 q_4' \cos(x_2 q_2' q_4'))^3 - x_2^2 q_3'^2 q_2'^2 \cos(x_4) \cos(x_2 q_2' q_4') \text{sgn}(a) \sqrt{|a|} + y_1$ ,

$a = \cos(x_1) + q_2'^2 + q_3' - q_3'^3 - x_1 - \cos(q_1') + \cos(x_1 q_2' q_4') + (x_4 q_4' \cos(x_2 q_2' q_4'))^2$ ,

$q_1' = 0, q_2' = 0,015, q_3' = 2,484, q_4' = 3,984$ .

На рисунке 9 приведены результаты моделирования полученной системы управления (29). Штрихпунктирной линией обозначены заданные траектории, а сплошной линией – полученное в результате автоматизированного синтеза решение. Значения функционалов качества составили  $J_1 = 0,698$ ,  $J_2 = 0,572$ .

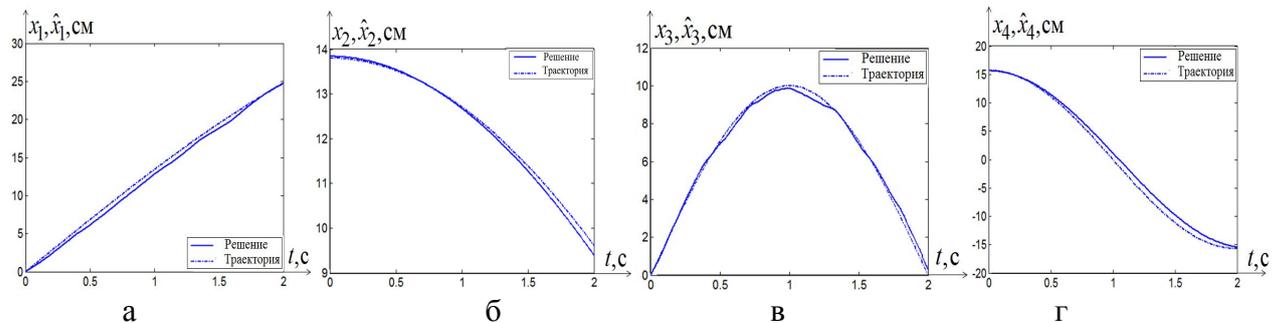


Рис. 9. Функции а –  $\hat{x}_1(t)$  и  $x_1(t)$ , б –  $\hat{x}_2(t)$  и  $x_2(t)$ , в –  $\hat{x}_3(t)$  и  $x_3(t)$ , г –  $\hat{x}_4(t)$  и  $x_4(t)$

Синтезированное управление (29) передали на реальный объект. На рисунке 10 приведены заданная траектория (27), результаты моделирования системы (13)–(16) с управлением (29) и траектория движения реального объекта.

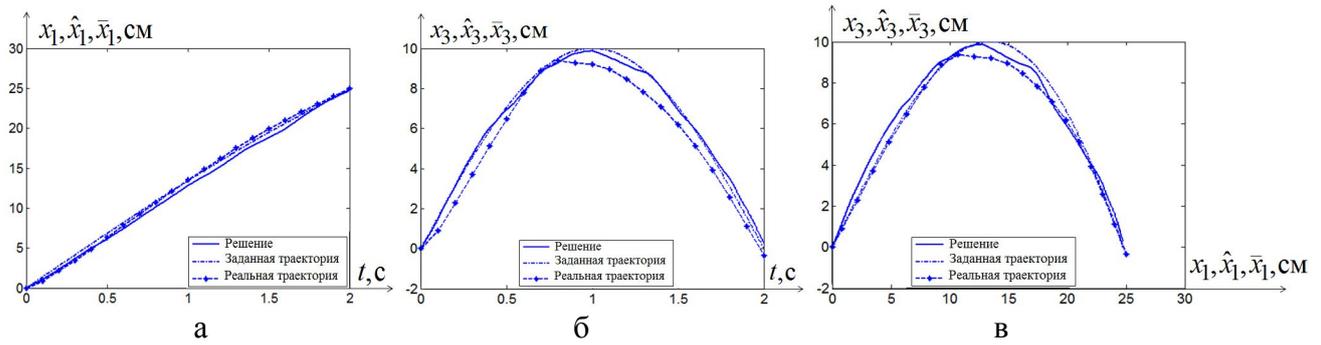


Рис. 10. а – Функции  $\hat{x}_1(t)$ ,  $x_1(t)$  и  $\bar{x}_1(t)$ , б – Функции  $\hat{x}_3(t)$ ,  $x_3(t)$  и  $\bar{x}_3(t)$ , в – Фазовые траектории  $x_3(x_1)$

**Эксперимент 4.** Задана траектория 2 в виде набора непрерывных функций времени

$$\hat{x}_1(t) = 19 \sin(t), \quad \hat{x}_2(t) = 19 \cos(t), \quad \hat{x}_3(t) = 24 \sin\left(\frac{\pi t}{5}\right), \quad \hat{x}_4(t) = \frac{24}{5} \pi \cos\left(\frac{\pi t}{5}\right). \quad (30)$$

Выбор траектории также обусловлен габаритами рабочего стола для проведения эксперимента, а также длиной USB кабеля.

При применении метода сетевого оператора для решения задачи синтеза для модели (19) – (22), получили систему управления:

$$u_i = \begin{cases} \operatorname{sgn}(y_i) 100, & \text{если } |y_i| \geq 100 \\ y_i & - \text{иначе} \end{cases}, \quad i = 1, 2. \quad (31)$$

где

$$y_1 = \sqrt{q_3'} - q_4' + \cos(-x_1 q_1' q_4'^3) - x_1 q_1' q_4'^3 (\sqrt{q_1'} + x_2 + q_4') + \operatorname{sgn}(E) \sqrt{|E|},$$

$$y_2 = -x_1 q_4'^2 E \operatorname{sgn}(y_1) \sqrt{|y_1|},$$

$$E = -\left(\sqrt{q_1'} + x_2 + q_4'\right) \left(2 - x_3 + \sqrt{q_3'} + \cos(x_4) + \cos(-x_1 q_1' q_4'^3)\right) \left(\cos(q_1') x_3^2 \cos(x_4) (q_4' - q_4'^3)\right)^3,$$

$$q_1' = 0,2343, \quad q_2' = 0,1023, \quad q_3' = 0,4243, \quad q_4' = 1,364.$$

На рисунке 11 приведены результаты моделирования полученной системы управления. На рисунках штрихпунктирной линией обозначены заданная траектория, а сплошной линией – полученное в результате автоматизированного синтеза решение.

Как видно из графиков, для полученной при идентификации математической модели (19)–(22) проведенный синтез системы управления (31) роботом LEGO Mindstorms NXT 2.0 обеспечивает качественное движение по заданной траектории (30). Значения функционалов качества составили  $J_1 = 0,9526$ ,  $J_2 = 2,0124$ .

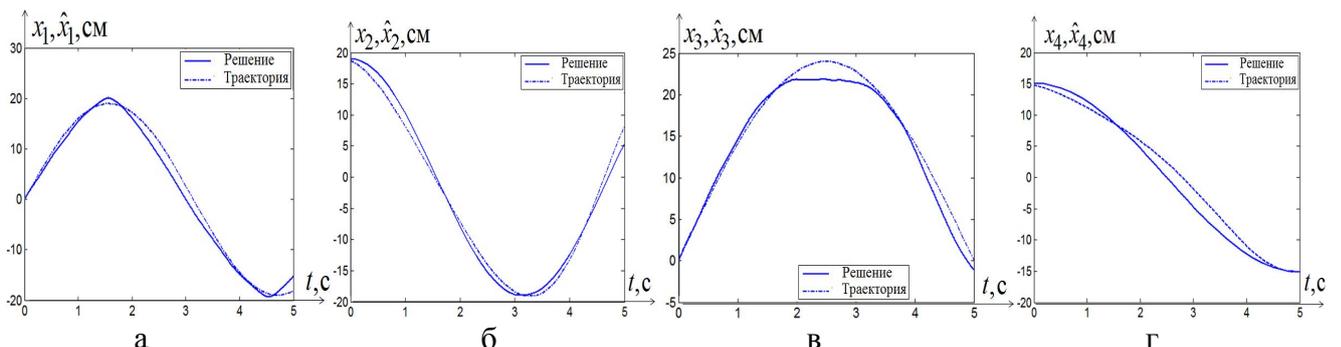


Рис. 11. Функции а –  $\hat{x}_1(t)$  и  $x_1(t)$ , б –  $\hat{x}_2(t)$  и  $x_2(t)$ , в –  $\hat{x}_3(t)$  и  $x_3(t)$ , г –  $\hat{x}_4(t)$  и  $x_4(t)$

Синтезированное управление (31) передали на реальный объект в виде векторов управлений в каждый момент времени, чтобы сравнить траекторию движения, полученную в результате синтеза идентификационного управления, с траекторией, по которой будет двигаться реальный робот.

На рисунке 12 приведены заданная траектория, результаты моделирования системы (19) - (22) с управлением (31) и реальная траектория, полученная на реальном объекте.

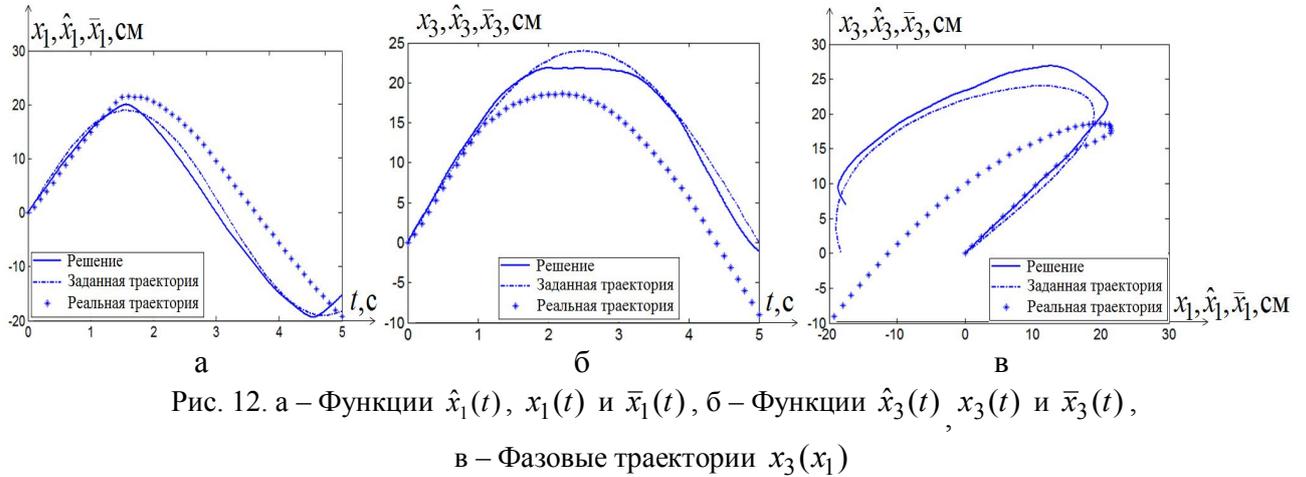


Рис. 12. а – Функции  $\hat{x}_1(t)$ ,  $x_1(t)$  и  $\bar{x}_1(t)$ , б – Функции  $\hat{x}_3(t)$ ,  $x_3(t)$  и  $\bar{x}_3(t)$ , в – Фазовые траектории  $x_3(x_1)$

При применении метода сетевого оператора для решения задачи синтеза для модели (22) – (25), получили модель системы управления:

$$u_i = \begin{cases} \text{sgn}(y_i)100, & \text{если } |y_i| \geq 100 \\ y_i & \text{иначе} \end{cases}, \quad i = 1, 2, \quad (32)$$

где

$$y_1 = -\cos(x_1) - q_1' - \sqrt{q_2'} - \cos(x_3) + \cos(\cos(q_1') + x_2 + \text{sgn}(x_4)\sqrt{|x_4|}) + (\cos(x_3) + q_3')^2 + E^3,$$

$$y_2 = \cos(x_1) + \cos(x_2) + \text{sgn}(x_3)\sqrt{|x_3|} - q_3' + (x_1 - x_1^3)x_3 \cos(x_4)q_4'(\cos(x_3) + q_3') + \\ + \text{sgn}(E)\sqrt{|E|} + \cos(x_3) + ((x_1 - x_1^3)x_3 \cos(x_4)q_4'(\cos(x_3) + q_3'))^3 + E^2,$$

$$E = \cos(x_1) + q_1' + \sqrt{q_2'} + \cos(x_3) + \cos(q_1') + x_2 + \text{sgn}(x_4)\sqrt{|x_4|},$$

$$q_1' = 1,9843, q_2' = 0, q_3' = 0,4843, q_4' = 3,984.$$

На рисунке 13 приведены результаты моделирования полученной системы управления. На рисунках штрихпунктирной линией обозначена заданная траектория, а сплошной линией – полученное в результате автоматизированного синтеза решение.

Как видно из графиков, для полученной при идентификации математической модели (23) – (26) проведенный синтез системы управления (32) роботом LEGO Mindstorms NXT 2.0 обеспечивает качественное движение по заданной траектории (30). Значения функционалов качества составили  $J_1 = 0,7436$ ,  $J_2 = 1,324$ .

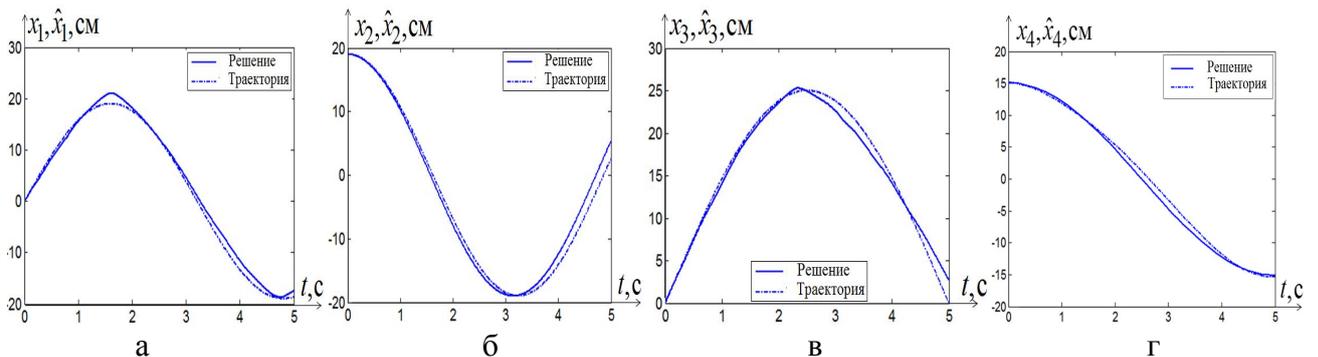


Рис. 13. Функции а –  $\hat{x}_1(t)$  и  $x_1(t)$ , б –  $\hat{x}_2(t)$  и  $x_2(t)$ , в –  $\hat{x}_3(t)$  и  $x_3(t)$ , г –  $\hat{x}_4(t)$  и  $x_4(t)$ .

Синтезированное управление (32) передали на реальный объект в виде векторов управлений в каждый момент времени, чтобы сравнить траекторию движения, полученную в результате синтеза идентификационного управления, с траекторией, по которой будет двигаться реальный робот.

На рисунке 14 приведены заданная траектория, результаты моделирования системы (23)–(26) с управлением (32) и реальная траектория, полученная на реальном объекте.

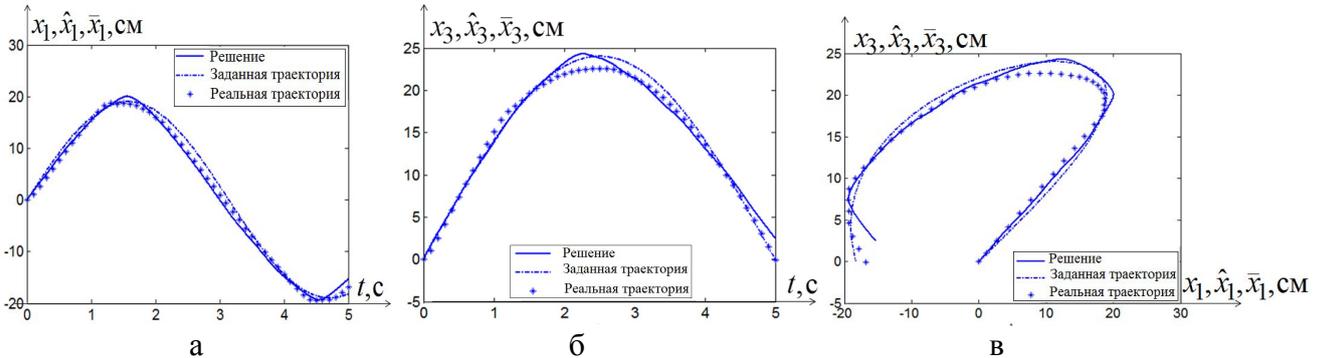


Рис. 14. а – Функции  $\hat{x}_1(t)$ ,  $x_1(t)$  и  $\bar{x}_1(t)$ , б – Функции  $\hat{x}_3(t)$ ,  $x_3(t)$  и  $\bar{x}_3(t)$ , в – Фазовые траектории  $x_3(x_1)$ .

• **Анализ результатов экспериментов.**

В таблице 1 приведены значения величин максимальных отклонений, полученных в результате вычислительного и натурального экспериментов для идентифицированных моделей 1 (19)–(22) и 2 (23)–(26).

Таблица 1. Сравнение по максимальными величинам отклонения, ( $J_2$ )

Траектория / Модель	Заданная траектория 1 (20)	Реальная траектория 1	Заданная траектория 2 (23)	Реальная траектория 2
Модель 1, (2 с)	0,63	5,015	2,012	8,425
Модель 2, (5 с)	0,572	1,154	1,325	1,532

Анализ результатов экспериментов показывает, что модель 2 (23)–(26) оказалась более точной и более приемлемой для задачи синтеза управления. Это связано с тем, что при идентификации модели 2 был использован БОЛЬШОЙ объем экспериментальных данных. При проведении натуральных экспериментов обе модели дали БОЛЬШУЮ погрешность по сравнению с вычислительными экспериментами. Интересно, что синтез управления для модели 2 обеспечил движение реального объекта незначительно хуже, чем в вычислительном эксперименте, хотя для модели 1 погрешность между вычислительным экспериментом и натурным оказалась существенной.

Синтез идентификационного управления для модели 2 по разным траекториям оказался более гибким, результаты компьютерного моделирования движения объекта с полученным управлением и результаты, полученные на реальном мобильном роботе, оказались достаточно близки.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Разработан численный метод сетевого оператора для решения задачи синтеза идентификационного управления робототехническим комплексом. Решены прикладные задачи синтеза идентификационного управления для моделей робота-манипулятора и мобильного робота с использованием разработанного двухэтапного метода сетевого оператора.

2. Разработана методика синтеза идентификационного управления робототехническим комплексом и критерии оценки применимости результатов синтеза

идентификационного управления на основе прикладной реализации синтезированного управления и исследования результатов экспериментов.

3. Разработанный двухэтапный численный метод сетевого оператора для решения задачи синтеза идентификационного управления робототехническим комплексом реализован в виде программного комплекса.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Данг, Т.Ф. Метод сетевого оператора для решения задачи синтеза идентификационного управления мобильным роботом / Т.Ф. Данг, А.И. Дивеев, Е.А. Софронова // Вестник Московского авиационного института. – 2015. – Т.22. – № 4. – С. 119-128.

2. Данг, Т.Ф. Задача синтеза идентификационного управления и ее решение методом сетевого оператора / Т.Ф. Данг, А.И. Дивеев, Е.А. Софронова // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4; URL: <http://www.science-education.ru/120-15517> (дата обращения: 20.02.2015).

3. Данг, Т.Ф. Синтез идентификационного управления мобильным роботом методом сетевого оператора / Т.Ф. Данг, А.И. Дивеев, Д.Э. Казарян, Е.А. Софронова // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2; URL: <http://www.science-education.ru/116-12860> (дата обращения: 10.09.2014).

4. Дивеев, А.И. Повышение качества решения задачи идентификации модели системы управления методом сетевого оператора / А.И. Дивеев, Т.Ф. Данг, Е.А. Софронова // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6; URL: <http://www.science-education.ru/113-11192> (дата обращения: 19.12.2013).

### Публикации в Scopus и Web of science

5. Dang, T.P. A Problem of Identification Control Synthesis for Mobile Robot by the Network Operator Method / T.P. Dang, A.I. Diveev, E.A. Sofronova // Proceedings of the 2016 11th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2016), Hefei, China, 5 – 7 June 2016. – IEEE, 2016. – P. 2417-2422. doi: 10.1109/ICIEA.2016.7603997.

6. Dang, T.P. Identification Control Synthesis By The Network Operator Method / T.P. Dang, A.I. Diveev, E.A. Sofronova // Proceedings of the 2015 10th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2015), Auckland, New Zealand, 15 – 17 June 2015. – IEEE, 2015. – P. 1559-1564. doi: 10.1109/ICIEA.2015.7334357.

### Прочие публикации

7. Данг, Т.Ф. Синтез идентификационного управления движением робота по пространственной траекторий методом сетевого оператора / Т.Ф. Данг // Задачи системного анализа, управления и обработки информации: межвузовский сборник научных трудов. Вып. 5. – М.: Изд-во МТИ, 2015. – С. 22-35.

8. Данг, Т.Ф. Метод сетевого оператора для решения задачи синтеза идентификационного управления манипуляционным роботом / Т.Ф. Данг, А.И. Дивеев, Е.А. Софронова // «Инженерные системы – 2015»: тезисы докладов Международной научно-практической конференции, Москва, 20-22 апреля 2015 г. – М.: Изд-во РУДН, 2015. – С.55.

9. Данг, Т.Ф. Синтез идентификационного управления техническим объектом методом сетевого оператора / Т.Ф. Данг, А.И. Дивеев, Е.А. Софронова // Восьмая Всероссийская мультиконференция по проблемам управления. Материалы 8-й Всероссийской мультиконференции в 3 томах. – Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2015. – Т. 2. – С. 121.

10. Данг, Т.Ф. Синтез идентификационного управления мобильным роботом методом сетевого оператора / Т.Ф. Данг, А.И. Дивеев, Е.А. Софронова // «Инженерные системы –

2014»: тезисы докладов Международной научно-практической конференции, Москва, 16-18 апреля 2014 г. – М.: Изд-во РУДН, 2014. – С.21.

11. Данг, Т.Ф. Синтез идентификационного управления мобильным роботом методом сетевого оператора / Т.Ф. Данг, А.И. Дивеев, Е.А. Софронова // Труды одиннадцатого международного симпозиума Интеллектуальные системы INTELS'2014; под ред. К.А. Пупкова. – Москва, 30 июня-04 июля 2014 г. – М.: Изд-во РУДН, 2014. – С. 66-69.

Подписано в печать 27.11.2017 г.  
Формат А5  
Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Тираж 100 экз. Заказ №116161-11-17  
Типография ООО «МДМпринт»  
(Печатный салон МДМ)  
119146, г. Москва, Комсомольский пр-кт, д. 28  
Тел. 8-495-256-10-00