

На правах рукописи

Туренко Тимофей Вячеславович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЛЕЙНЫХ И ЛОГИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПО ГИБРИДНЫМ МОДЕЛЯМ**

Специальность: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические системы).

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

Санкт-Петербург – 2007

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина).

Научный руководитель –  
кандидат технических наук, профессор Кузьмин Николай Николаевич

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук, профессор Лукомский Юрий Александрович  
кандидат технических наук, доцент Королёв Вячеслав Семёнович

Ведущая организация – Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)

Защита диссертации состоится «\_14\_» \_мая\_ 2007 г. в 17 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.07 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «13» апреля 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Яшин А. И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Предметом исследований и разработок диссертационной работы является развитие методов анализа периодических режимов в автоматических системах с релейно-импульсными и логическими алгоритмами управления по гибридным моделям.

Недорогие и надежные релейные системы управления широко применяются в различных областях техники. Известны релейные системы автоматического регулирования температуры, напряжения, числа оборотов, системы автоматической подстройки частоты, автоматические потенциометры, автоколебательные конверторы, автопилоты, системы автоматической ориентации космических аппаратов и многие другие. В релейных и релейно-импульсных системах управления текущее состояние объекта управления известно с точностью до принадлежности к конечному множеству ситуаций, а воздействия на объект также принимают значения из конечного множества малой мощности. В силу этого алгоритмы управления, естественно, оказываются логическими, а в системах одновременно имеют место как непрерывные, так и дискретные по уровню сигналы, что свидетельствует о гибридной сущности релейных систем.

Релейные автоматические системы в разное время становились предметом пристального изучения многих специалистов в области нелинейной динамики, теории и практики автоматического регулирования и управления. Трудно дать исчерпывающий обзор работ по релейным и логическим системам управления, по системам с переменной структурой и разнообразным способам коррекции переключением сигналов и т. п. Наиболее известными в этой области являются работы Я. З. Цыпкина, А. А. Кампе-Немма, А. С. Ключева, Б. Н. Петрова, М. В. Стариковой, С. В. Емельянова, Ю. В. Долголенко, Ю. И. Неймарка, Г. С. Поспелова, Б. Н. Наумова, Р. А. Нелепина, С. М. Федорова, Е. Н. Розенвассера, Р. М. Юсупова, Е. И. Хлыпало, С. Н. Шарова, А. А. Вавилова, Д. Х. Имаева, а также зарубежных авторов Дж. Тэлера (G. J. Thaler), М. Пестеля (M. P. Pastel), Д. П. Атертона (D. P. Atherton), Б. Хамеля (B. Hamel), И. Флюгге-Лотца (I. Flugge-Lotz) и др.

**Актуальность темы диссертации.** В последние два десятилетия развитие техники и технологий привело к повышению интереса к *переключающимся* системам и к *гибридным* системам, образованным подсистемами различных типов и уровней иерархии. При этом огромное число публикаций посвящено языковым проблемам, т. е. формальному описанию гибридных систем. Гораздо меньше работ выполнено по развитию методов анализа и синтеза этого класса систем автоматического управления.

Контур управления в релейных системах замыкается только в моменты смены событий, когда изменения управляемой переменной приводят к переключениям реле. Для большинства таких систем нормальным режимом функционирования оказывается *автоколебательный* режим. Периодические переключения реле обеспечивают, с одной стороны, восполнение недостатка текущей информации, а с другой — необходимое разнообразие управляющих воздействий. Отсюда наиболее востребованными на практике являются методы исследования периодических режимов в релейных системах.

Для простейших релейных систем разработаны точные методы анализа периодических режимов. Частотный метод Цыпкина и временной метод Хамеля используют тот факт, что форма колебаний на выходе типовых релейных элементов известна, что позволяет свести задачу к поиску нескольких параметров. Однако графоаналитические методики, базирующиеся на традиционном описании релейных преобразователей в виде статических характеристик (СХ), не позволяют исследовать периодические процессы в нелинейных системах высокого порядка и адекватно описывать сложные алгоритмы. Непосредственное применение программ компьютерного моделирования для поиска периодических режимов также сопряжено со значительными трудностями. Необходима радикальная модернизация способов математического описания, анализа и имитации релейных и логических систем управления на базе современных компьютерных технологий. Противоречие между ограниченными возможностями традиционных способов анализа и потребностями практики в новых технологиях исследования указанного класса систем делает актуальной научную задачу разработки методов исследования релейных и логических систем управления по гибридным моделям.

**Целью диссертационной работы** является разработка методов анализа установившихся процессов в релейных системах управления по гибридным моделям.

Для достижения цели необходимо решить ряд **основных задач**.

1. Разработка гибридных моделей релейно-импульсных и логических систем управления и методов их построения и преобразования.
2. Разработка метода анализа равновесных режимов в релейно-импульсных системах с обратной связью.
3. Разработка точного метода анализа периодических режимов в релейно-импульсных системах управления.
4. Разработка алгоритмического и программного обеспечения методов анализа установившихся процессов.
5. Имплементация гибридных моделей релейно-импульсных систем в среде универсальных программ компьютерного моделирования.
6. Реализация лабораторных макетов релейно-импульсных систем управления, расчет установившихся процессов по их гибридным моделям, компьютерное моделирование и экспериментальные исследования.

**Методы исследования:** теория автоматического управления, теория автоматов, теория графов, численные методы и компьютерное моделирование.

**Основная идея** работы заключается в развитии точных методов Цыпкина и Хамеля для исследования периодических режимов в релейных, релейно-импульсных и логических системах управления по гибридным моделям на базе современных программ компьютерного моделирования. Принятый в диссертации подход к анализу периодических процессов базируется на так называемых *прямых* методах. В основе прямого метода лежит проверка того, удовлетворяет ли некоторая наперед заданная функция исходному уравнению. Если задается *форма* решения, то задача *параметризуется*; вместо функции времени ищутся параметры периодической функции известной формы, при подстановке которой в уравнение должно получаться тождество. В случае машинно-ориентированного подхода прямые методы имеют алгоритмическую природу, а процедура становится поисковой.

### **Научные результаты, выносимые на защиту:**

1. Гибридные модели релейно-импульсных систем управления.
2. Метод перечисления точных форм периодических колебаний в гибридных системах с обратной связью.
3. Методика поиска параметров периодических колебаний на базе программ компьютерного моделирования.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается применением апробированных программных средств компьютерного моделирования, тщательным выбором численных методов и алгоритмов обработки данных, сопоставлением результатов решения иллюстративных и практических примеров с результатами моделирования, а также близостью результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными на лабораторных макетах релейно-импульсных систем управления.

### **Новизна научных результатов** заключается в следующем.

1. Гибридные модели релейно-импульсных систем управления отличаются тем, что используют автоматное представление преобразователей с неоднозначными кусочно-постоянными статическими характеристиками, что позволяет единообразно описать системы с релейными, релейно-импульсными и логическими алгоритмами, упростить компьютерное моделирование систем и аппаратную реализацию управляющих устройств.

2. Метод перечисления точных форм периодических колебаний в гибридных системах с обратной связью, отличается тем, что включает в себя анализ равновесных состояний гибридных систем и замкнутых маршрутов в графах переходов автоматов, что позволяет уменьшить неопределенность относительно точных форм периодических процессов.

3. Методика поиска параметров периодических колебаний на базе программ компьютерного моделирования, отличается тем, что является компьютерной версией прямых методов теории дифференциальных уравнений и использует процедуру подстановки в компьютерные модели точных форм периодических решений с последующей идентификацией установившихся реакций разомкнутой системы, что позволяет автоматизировать поиск искомых параметров колебаний.

**Практическая ценность** результатов диссертации определяется тем, что разработанные модели, методы, алгоритмы и программы представляют собой комплекс автоматизированного анализа равновесных режимов и периодических процессов в релейных, релейно-импульсных и логических системах управления. Комплекс позволит проектировать автоматические системы с новыми логическими алгоритмами для управления техническими объектами на основе малой информации о состоянии объектов и при недостаточном разнообразии уровней управляющих воздействий. Специализированная объектно-ориентированная программная реализация релейных и релейно-импульсных преобразователей с многозначными характеристиками, позволяет минимизировать вычислительные затраты и использовать преобразователи в системах реального времени.

**Реализация результатов работы.** Практическое значение диссертации подтверждается актами о внедрении результатов исследования в ОАО "Концерн "Гранит-Электрон", ЗАО ОКБ "Русская Авионика" и ЗАО "Ассоциация предприятий морского приборостроения", на кафедре Автоматики и процессов управления

Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ленина. Часть вычислительных экспериментов по компьютерной имитации выполнена в рамках Договора о межвузовском сотрудничестве с Техническим университетом Ополе (Польша) по теме: "Внедрение компьютерных программ в учебный процесс вуза и повышение квалификации преподавателей".

**Апробация работы.** Результаты научных и практических исследований автора докладывались на 7 научно-технических конференциях: 4-я конференция молодых ученых "Навигация и управление движением", 12-14 марта 2002 г., С-Петербург, VIII международная конференция "Современные технологии обучения", 24 апреля. 2002 С-Петербург, Всероссийская научная конференция "Проектирование научных и инженерных приложений в среде Matlab", Москва, 28-29 мая 2002 года, V Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям, С-Петербург, 25-27 июня 2002 года, Всероссийская научная конференция "Управление и информационные технологии", С-Петербург, 3—4 апреля 2003 года, 3-я Всероссийская научная конференция "Управление и информационные технологии", С-Петербург, 30 июня — 2 июля 2005 г., 4-я Всероссийская научная конференция "Управление и информационные технологии", С-Петербург, 10—12 октября 2006 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, из них 3 статьи в журналах из перечня изданий, рекомендованных ВАК, 9 работ в материалах всероссийских и международных научных и научно-технических конференций, два доклада на международных конференциях, одно свидетельство на полезную модель, один патент на полезную модель, один патент на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 126 наименования. Основная часть диссертации изложена на 144 страницах машинописного текста. Работа содержит 72 рисунка и 10 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** описывается предмет работы, кратко анализируется состояние проблемы и делается вывод об актуальности дальнейших исследований и разработок. Сформулированы цель и задачи работы, изложена основная идея принятого подхода и перечислены методы исследований.

**Первая** глава посвящена примерам рассматриваемого класса систем управления техническими объектами, анализу проблемы адекватного математического описания, задачам исследования и программным средствам моделирования и расчета нелинейных динамических систем. Делается вывод о необходимости развития форм математического описания, методов расчета равновесных и периодических режимов и программ компьютерного моделирования.

Приведены примеры релейно-импульсных систем управления. В системе управления положением космического аппарата для управления используются два реактивных сопла ("вперед" и "назад"), которые могут быть полностью закрыты или полностью открыты. Релейно-импульсный алгоритм управления основан на открытии соответствующего сопла в течение заданного промежутка времени при достижении сигналом ошибки определенных уровней. В электромеханической по-

зиционной системе управления предусмотрено торможение двигателя импульсом противовключения заранее определенной длительности при приближении к заданной точке. На рис. 1 условно показана СХ регулятора позиционной системы управления ( $U_{\max}$  – максимальное управляющее воздействие,  $U_{\Pi}$  – управляющее воздействие, соответствующее ползущей скорости,  $\Delta a_1$  – порог, отделяющий начало импульса противовключения,  $\Delta a_2$  – порог отключения двигателя). Примером релейно-импульсных систем также являются системы, содержащие формирователь ШИМ-сигнала, который является *таймированным* устройством, т. е. его состояние может изменяться не только при изменении входного сигнала, но и по истечении заданного времени. Релейно-импульсные преобразователи можно определить как многозначные с ограничением времени пребывания на ветвях, т. е. как таймированные СХ.

Классическими для теории конечномерных непрерывных нелинейных динамических систем математическими (символьными) моделями являются обыкновенные дифференциальные уравнения (ДУ). В случае релейных систем управления, функции, описывающие связи между переменными и их производными, не являются непрерывными и однозначными. Их необходимо дополнять описанием правил перехода между различными выражениями в правой части ДУ. Типовая структура нелинейной системы управления подразумевает разделение

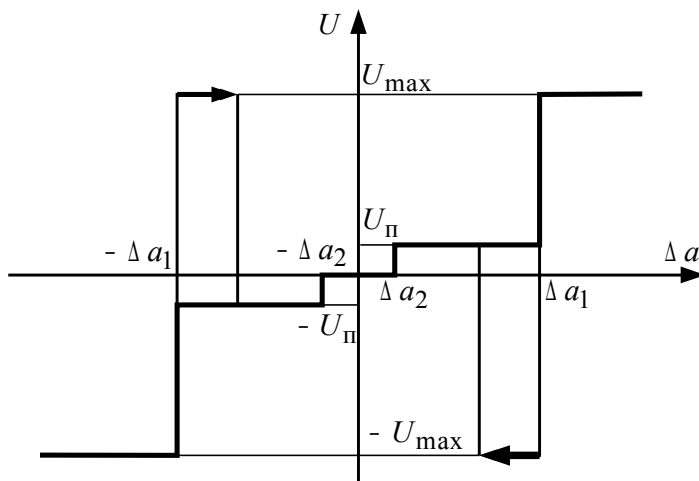


Рис. 1. Пример СХ регулятора электромеханической позиционной системы управления

на динамическую линейную часть и безынерционный нелинейный элемент, который может быть описан в виде модели "вход—выход", например, в виде многозначных СХ. Другим подходом к описанию релейных элементов является представление их в виде модели "вход—состояние—выход" (рис. 2). На входе и выходе логического устройства принятия решения присутствуют символьные переменные  $\tilde{x}$  и  $\tilde{y}$ , т. е. модель является гибридной.

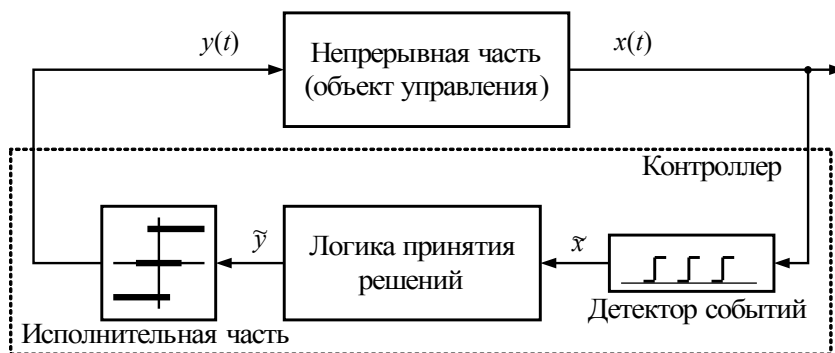


Рис. 2. Типовая структура релейной системы управления

на динамическую линейную часть и безынерционный нелинейный элемент, который может быть описан в виде модели "вход—выход", например, в виде многозначных СХ. Другим подходом к описанию релейных элементов является представление их в виде модели "вход—состояние—выход" (рис. 2). На входе и выходе логического устройства принятия решения присутствуют символьные переменные  $\tilde{x}$  и  $\tilde{y}$ , т. е. модель является гибридной.

Задачи анализа релейных систем управления те же, что и по другим классам моделей — анализ равновесных и иных типов установившихся и пере-

Задачи анализа релейных систем управления те же, что и по другим классам моделей — анализ равновесных и иных типов установившихся и пере-

ходных движений, а также их устойчивости, анализ свойств инвариантности и грубости. Поскольку модели релейных систем являются существенно нелинейными, для исследования процессов, сопровождаемых переключениями реле, нельзя применять линеаризацию для малых отклонений. Анализ систем должен начинаться с исследования существования и единственности состояний равновесия, а позднее, их расчета.

Традиционные методы расчета автоколебаний в релейных системах ориентированы на системы с типовой структурой. К точным методам относятся методы Цыпкина и Хамеля, базирующиеся на том, что на *выходе* простейшего релейного элемента формы колебаний известны *точно*. Задача сводится к поиску единственного параметра — периода колебаний. В частотном методе Цыпкина используется разложение прямоугольного сигнала в ряд Фурье, а метод Хамеля использует временной подход и идеи метода фазовой плоскости. Приближенный частотный метод гармонического баланса применим, если линейные части удовлетворяют условиям фильтра или резонанса, что позволяет принять гипотезу о *приближенно* гармонической форме периодического сигнала на *входе* нелинейного элемента.

Приводится обзор программных средств моделирования и анализа нелинейных динамических систем, применимых при исследовании релейно-импульсных систем. Основной упор разработчики программ делают на средства численного решения *задачи Коши* — получение частных решений обыкновенных ДУ при заданных начальных условиях. Одним из наиболее распространенных языков компьютерного моделирования является язык программы Simulink, в котором модель представляет собой структурную схему, образованную ориентированным взаимодействием блоков направленного действия. Для моделирования систем управления на базе "непричинных" схем существует ряд специализированных программных средств, таких как Dymola, MathModelica, OmSim, HyTech, LabView.

Компьютерная имитация является универсальным методом анализа конкретных движений в системах с релейными характеристиками. Ее недостатком является невозможность вывода суждений общего характера о динамике системы. Для систем с произвольными релейно-импульсными алгоритмами управления отсутствует единая методика реализации релейно-импульсных и логических систем управления в среде универсальных программ компьютерного моделирования; трудно планировать вычислительные эксперименты с учетом априорной информации о форме решения; сложно организовать целенаправленный поиск в пространстве состояний, не решаются проблемы существования и единственности; таким способом практически нельзя отыскать неустойчивые решения.

**Вторая глава** посвящена разработке гибридных моделей релейных и релейно-импульсных систем управления. Известны гибридные модели Тавернини (L. Tavernini), Бэка—Гукенхеймера—Маейра (A. Back, J. Guckenheimer, G. Meyer), Брокета (R. W. Brockett), Нероде—Кона (A. Nerode, W. Kohn), гибридные автоматы. В качестве основной формы описания релейных систем с многозначными характеристиками принимается автоматное представление релейных элементов, используемое в модели Нероде—Кона, которая образована непрерывной и дискретной частями, взаимодействующими посредством интерфейса. Логика управляющего устройства — контроллера (рис. 2) в модели Нероде—Кона представляется конечным автоматом (КА), вход и выход которого принимают значения из конечных



множеств символов. Автомат задается пятеркой  $\langle S, Y, X, \delta, \lambda \rangle$ , где  $S, Y, X$  — конечные множества состояний, выходов и входов автомата;  $\delta, \lambda$  — функции переходов и выходов. Интерфейс моделирует конвертирование сигналов.

Переход от традиционной модели "вход—выход" в виде СХ к гибридной модели "вход—состояние—выход" осуществляется следующим образом. Входная часть интерфейса (информационная часть, детектор событий, аналого-символьный интерфейс) представляет собой совокупность пороговых элементов с уставками, равными значениям входного сигнала в точках разрыва СХ. Участкам непрерывности СХ отвечают различные события, число которых на единицу больше числа пороговых элементов. Важной особенностью входного алфавита автомата  $X = \{x_1, x_2, \dots\}$  является упорядоченность символов, обусловленная непрерывностью по уровню входной переменной. Выходная, исполнительная часть интерфейса — дешифратор (декодер) — ставит в соответствие символам выходного алфавита автомата  $Y = \{y_1, y_2, \dots\}$  действительные значения выходного сигнала релейного элемента. Автомат строится следующим образом. Релейная многозначная СХ разбивается на участки, соответствующие состояниям входа (входным символам), т. е. на участки постоянства значения выхода. Для каждого участка задается столько состояний автомата, сколько ветвей имеет характеристика на данном участке. Исходя из логики (графа) переходов между ветвями строится функция переходов автомата  $\delta$ . В таком автомате, зная текущее состояние, можно однозначно определить, какой символ в данный момент на входе, т. е. каждому входному символу из  $X$  соответствует подмножество  $S_i$  множества  $S$ :

$$\tilde{x} = \tilde{x}_i \Leftrightarrow s \in S_i; \forall i \neq j S_i \cap S_j = \emptyset; \bigcup S_i = S. \quad (1)$$

Условие (1) может не выполняться в момент времени  $t = 0$  в случае произвольного начального состояния. Необходимо дополнить автомат функцией начального состояния  $\sigma(\tilde{x}_0)$ , которая ставит в соответствие символу на входе автомата в момент времени  $t = 0$  состояние из множества  $S$  и обладает следующим свойством:  $\sigma(\tilde{x}_i) \in S_i$ . Автомат, дополненный функцией  $\sigma$ , может быть преобразован к классическому КА путем дополнения множества  $S$  состояний автомата выделенным начальным состоянием  $s_0$  и переходами из этого состояния в соответствии с

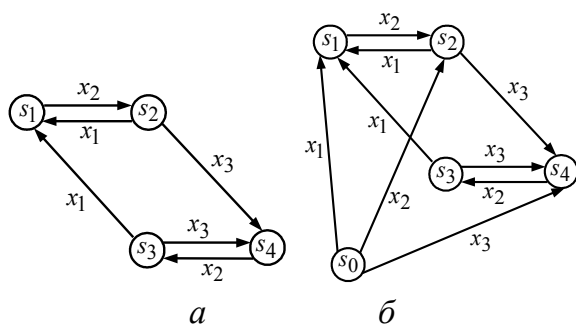


Рис. 3. Граф КА реализующего модель реле с гистерезисом: исходный (а), с учетом функции начального состояния (б)

функцией  $\sigma$ . В полученном автомате условие (1) выполняется. На рис. 3 показаны графы исходного КА, реализующего модель реле с гистерезисом (рис. 3, а), и граф КА, полученного путем преобразования автомата, дополненного функцией начального состояния (рис. 3, б).

Рассматриваемые преобразователи, реализуемые на основе КА, применяются при машинном моделировании гибридных систем. В связи с этим, приобретает актуальность задача минимизации вычислительных затрат, а следовательно, задача минимизации автомата, используемого в преобразователях.

Методика основана на объединении состояний, которым соответствуют одинаковые строки таблицы переходов с точностью до незаполненной ячейки.

Для реализации преобразователей с ограниченными временем пребывания на ветвях используем таймированный автомат:  $A_T = \langle S, S^0, \Sigma, C, I, E \rangle$ , где  $S$  — множество состояний,  $S^0$  — начальное состояние,  $\Sigma$  — множество меток,  $C$  — множество таймеров,  $E$  — множество переходов. Переход представляется  $\langle s, \tilde{x}, c_c, c_r, s' \rangle$ , где:  $s$  — состояние до перехода,  $\tilde{x}$  — входной символ, при котором происходит переход,  $c_c$  — логическая функция от значений всех таймеров из  $C$ : если функция  $c_c$  принимает значение "истина", то происходит переход;  $c_r$  — множество таймеров, обнуляемых при данном переходе ( $c_r \subset C$ );  $s'$  — состояние после перехода. В автомате существует два вида переходов: переходы по входному символу, для которых функция  $c_c \equiv$  "истина" и переходы по истечению времени пребывания на ветви (переходы "по таймеру") при неизменном входном символе. Будем рассматривать сигнал таймера как дополнительный входной сигнал (рис. 4), а множество  $X$  дополняется символом истечения времени  $t_e$ , который возникает при достижении сигналов таймера значения  $\gamma(s)$ . Таймированный автомат  $\langle S, \sigma(x_0), \Sigma, C, I, E \rangle$  с одним таймером ( $|C|=1$ ) может быть преобразован к автомату, в котором все переходы могут быть разделены на переходы по изменению входного символа и переходы по символу таймера. На рис. 5 показан граф таймированного автомата, реализующего управляющее устройство электромеханической позиционной системы (см. рис. 1): исходный (рис. 5, а) и преобразованный (рис. 5, б)

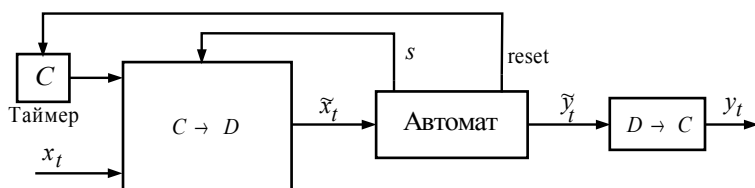


Рис. 4. Модель релейно-импульсного преобразователя

Таймированный автомат  $\langle S, \sigma(x_0), \Sigma, C, I, E \rangle$  с одним таймером ( $|C|=1$ ) может быть преобразован к автомату, в котором все переходы могут быть разделены на переходы по изменению входного символа и переходы по символу таймера.

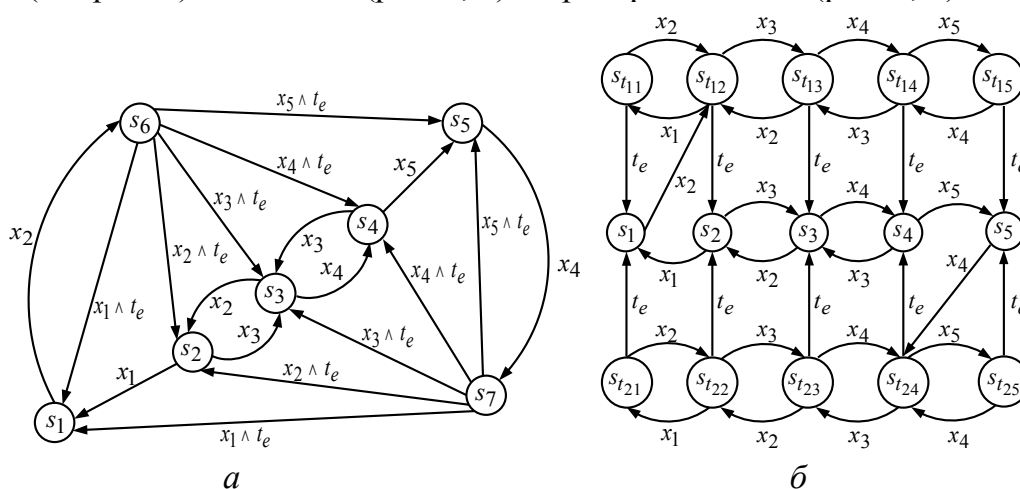


Рис. 5. Граф КА, реализующего модель управляющего устройства электромеханической позиционной системы: исходный (а), преобразованный (б)

**Третья глава** посвящена разработке методов анализа состояний равновесия и периодических режимов в гибридных системах управления.

Состояния равновесия являются важнейшими для любых динамических систем. Положения равновесия можно найти по моделям статики, получаемым из динамических моделей приравниванием производных нулю. Легко показать, что если СХ элементов разомкнутой системы являются кусочно-линейными относительно своих аргументов, то СХ замкнутой системы также кусочно-линейна. Построение СХ замкнутой системы сводится к пересчету координат "узлов" кусочно-линейных характеристик. СХ замкнутой релейной системы не определены для некоторых интервалов. Численное решение уравнения статики можно проводить методом простой итерации (алгоритм Пикара). В общем случае алгоритм может и не сходиться.

**Теорема:** Если алгоритм Пикара для уточнения состояний равновесия гибридной системы с кусочно-постоянной СХ релейного элемента сходится, то он сходится за конечное число шагов.

**Следствие:** Если начальное приближение  $x_0$  принадлежит той же ветви СХ, что и искомое решение, то алгоритм сходится за один шаг.

Устойчивость состояний равновесия замкнутых систем с кусочно-постоянными СХ нелинейного элемента определяется устойчивостью непрерывной части. Если непрерывная часть гибридной системы рассматриваемого класса линейна и устойчива, то любое состояние равновесия устойчиво "в большом" (исключаются из рассмотрения точки разрыва СХ).

Рекомендуется предварительное изучение состояний равновесия по графическим построениям, тем самым, решая проблемы существования, единственности и назначения начальных условий для численного уточнения решений.

Подходы к анализу периодических процессов в нелинейных системах базируются на так называемых *прямых* методах. Пусть исходная модель представлена в форме однородного ДУ  $\Phi(x, x', \dots, x^{(n)}) = 0$ . Рассмотрим другое равносильное уравнение:

$$\Psi(x, x', \dots, x^{(n)}) = x, \quad \Psi = \Phi + x. \quad (2)$$

Рассмотрим неоднородное ДУ

$$\Psi(x, x', \dots, x^{(n)}) = y, \quad (3)$$

описывающее *разомкнутую* систему, находящуюся под воздействием  $y(t)$ .

Системы (2) и (3) эквивалентны, если реакция разомкнутой системы  $x(t)$  тождественна воздействию:

$$y(t) \equiv x(t). \quad (4)$$

В качестве воздействия в правой части уравнения (3) будем выбирать "функции-кандидаты" на решение, в частности, периодические функции  $y(t, \alpha) = y(t + T, \alpha)$ , причем, период  $T$  и, быть может, другие параметры  $\alpha$  подлежат определению. Результатом "подстановки" является реакция разомкнутой системы. Если реакция совпадет с воздействием, то будет получено искомое решение.

На рис. 6, б изображена соответствующая структура разомкнутой системы, на вход которой подается сигнал от генератора сигналов с перестраиваемыми пара-

метрами. Модели систем управления, как правило, изначально имеют вид контура, они легко приводятся к структуре с единичной обратной связью (рис. 6, а).

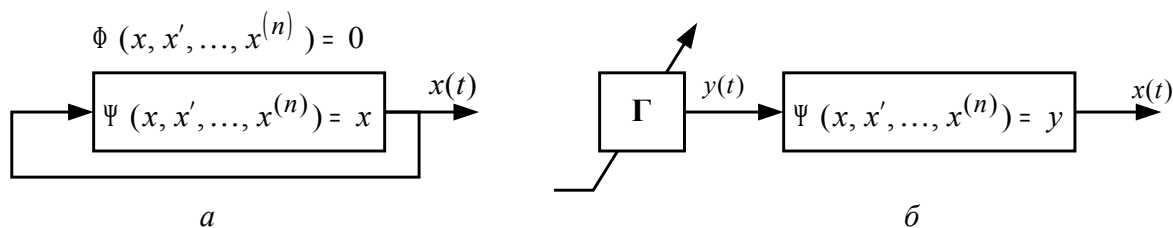


Рис. 6. Структуры замкнутой (а) и разомкнутой (б) систем

Необходимо выбрать переменную, о форме которой имеется максимальная информация, и разомкнуть контур в этом месте. На рис. 7 показаны варианты выбора точки разрыва системы, где символом  $\mathcal{O}$  обозначен оператор, вычисляющий установившийся процесс на выходе непрерывной части.

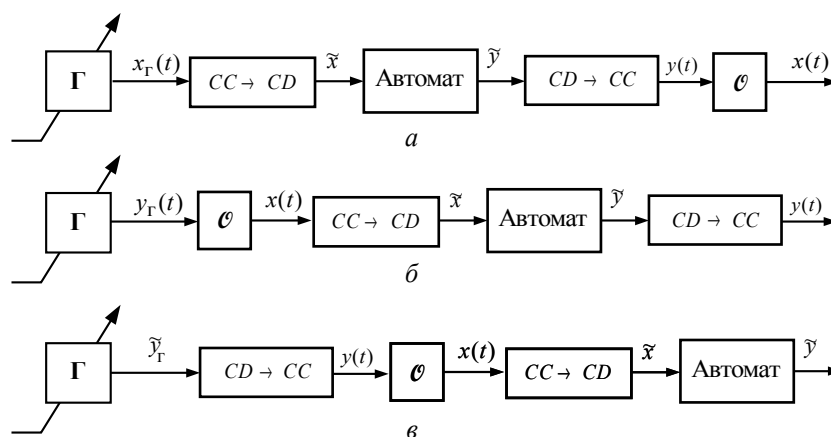


Рис. 7. Варианты выбора точки разрыва системы: на выходе непрерывной части (а), на выходе релейного элемента (б), на выходе автомата (в)

Если разорвать систему на выходе фильтрующей непрерывной части (рис. 7, а), то приходим к приближенному методу гармонического баланса. Точная форма сигнала известна на выходе релейного элемента (рис. 7, б), что используется в методах Цыпкина и Хамеля. Использование сигнала на выходе автомата (рис. 7, в) приводит к тому, что вместо непрерывных сигналов можно сравнивать параметры последовательностей символов (моменты смены символов), что является особенностью разработанного метода.

Для проверки тождества (4) используется компьютерное моделирование разомкнутой системы, находящейся под периодическим воздействием. Методика определения периодических режимов состоит из следующих этапов.

1. Назначается форма искомого режима.
  2. Выбираются начальные значения параметров.
  3. Проводится компьютерное моделирование до практического установления процесса, и определяются параметры установившейся реакции.
  4. Если значения параметров близки, то решение найдено, иначе осуществляется переход к шагу 5.
  5. Изменяются параметры воздействия, и осуществляется переход к шагу 3.
- Методика применима, если непрерывная часть системы устойчива в термини-

нах "вход—выход", а установившаяся реакция имеет тот же период, что и входной сигнал.

Должна быть предусмотрена возможность изменения параметров периодического сигнала по результатам очередной итерации, а также выбора формы сигнала. Таким образом, вместо случайного перебора в  $n$ -мерном пространстве состояний динамической системы применим *целенаправленный* перебор в пространстве искомых параметров периодического решения искомой формы. Полностью используется априорная информация о форме и параметрах решений.

Анализ гибридных систем должен начинаться с исследования существования и единственности состояний равновесия. При отсутствии состояний равновесия можно предположить, что замкнутая система управления функционирует в режиме автоколебаний, восполняющих недостаток текущей информации о состоянии объекта и увеличивающих разнообразие управляющих воздействий.

Метод перечисления возможных форм установившихся колебаний основан на результатах исследования состояний равновесия и на анализе замкнутых маршрутов в графе переходов автомата. Назовем предельный цикл *элементарным*, если ему отвечает контур в графе длины два. Пример последовательности состояний, порождаемой таким контуром  $\{a b a b a \dots\}$ . *Простыми* назовем предельные циклы, порожденные контурами или замкнутыми маршрутами в орграфах переходов, в которых не повторяются дуги. Простые предельные циклы могут различаться *длиной* маршрута, т. е. числом дуг ( $\{a b c b a b c b \dots\}$ ,  $\{a b c d c b a b c d c b \dots\}$ ). При длине два (контур в графе) получится элементарный цикл. *Сложными* назовем предельные циклы, которым соответствуют замкнутые маршруты, в которые не только вершины, но и *дуги* графа могут входить несколько раз ( $\{a b a b c b a b a b c b \dots\}$ ,  $\{a b c b c b a b c b c b \dots\}$ ,  $\{a b a b c b c b a b a b c b c b \dots\}$ ).

**Четвертая глава** посвящена компьютерному моделированию, анализу и реализации релейно-импульсных систем управления.

Анализ установившихся процессов состоит следующих основных этапов:

- предварительный анализ;
- построение гибридной модели системы;
- вычислительные эксперименты с гибридной моделью разомкнутой системы;
- вычислительные эксперименты с гибридной моделью замкнутой системы.

Для вычислительных экспериментов с гибридными моделями можно использовать универсальные программы компьютерного моделирования, в частности, далее будет рассмотрено применение для этих целей Matlab/Stateflow и Matlab/Simulink. В этом случае непосредственно модель реализуется в среде Simulink, а алгоритм поиска периодических решений реализуется программой на языке Matlab, которая при помощи функции *sim* осуществляет моделирование процессов в системе при заданном воздействии на заданном интервале времени. При этом все параметры численного решения ДУ (метод, шаг) задаются этой программой. Проблемы численного решения обусловлены тем, что соответствующие ДУ имеют разрывную правую часть. Однако в случае необходимости максимально увеличить быстродействие программы или аппаратной реализации части моделей оправдана разработка специализированной программы. Для этого случая был разработан на-

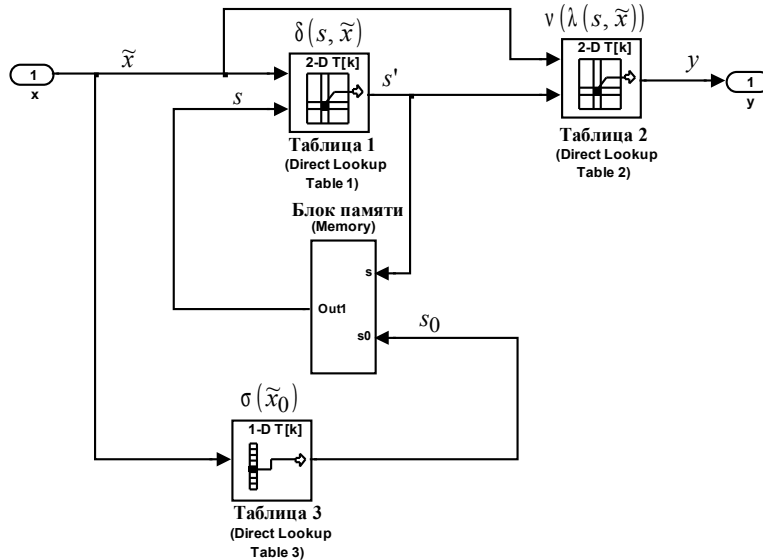


Рис. 9. Реализация модели автомата, дополненного функцией начального состояния

бор объектов, реализующих основные компоненты гибридной модели.

Пакет *Stateflow* является интерактивным инструментом разработки в области моделирования сложных, управляемых событиями систем. Он тесно интегрирован с Matlab и Simulink и основан на теории КА. Несомненными достоинствами реализации моделей релейных преобразователей в Stateflow является наглядность представления графа автомата, возмож-

ность интегрирования в модели Simulink, наличие средств визуализации работы автомата. Однако такая реализация имеет ряд серьезных недостатков: аналого-символьный интерфейс реализуется многократно (на каждом ребре графа), что существенно увеличивает вычислительную сложность задач, использующих данную модель; осложняется контроль над процессом поиска моментов переключений (управления выбором шага численного интегрирования при моделировании). Графическое представление затрудняет автоматизацию экспериментов с моделью, невозможно программное задание автомата.

Указанные недостатки устранены в реализации модели гибридных систем в среде Matlab/Simulink. Реализация аналого-символьного интерфейса основана на использовании набора пороговых элементов, составляющих блок пороговых элементов и блока формирования символа. Модель автомата содержит таблицу, реализующую функцию переходов  $\delta(s, \tilde{x})$  — блок Таблица 1 (Direct Lookup Table 1) (рис. 9), блок памяти состояния (Memory), таблицу, реализующую функцию выхода  $\lambda(s, \tilde{x})$  — Таблица 2 (Direct Lookup Table 2). При этом Таблица 2 может содержать как коды выходных символов, так и непосредственно значения выходного сигнала, т. е. реализовывать и символьно-аналоговый интерфейс — преобразование  $v(\lambda(s, \tilde{x}))$ . Схема дополнена блоком логики, формирующим начальное состояние, т. е. реализующим функцию  $\sigma(\tilde{x}_0)$ , а блок памяти состояния (Memory) модифицирован для обеспечения возможности задания начального состояния.

Для реализации компьютерной модели таймированного автомата необходимо в аналого-символьный интерфейс добавить блок генерации символа таймера  $t_e$ .

Выбор метода и параметров численного решения ДУ является определяющим фактором реализации разработанного метода поиска периодических режимов. При решении задачи поиска периодических решений в гибридных системах важна точность поиска моментов переключения. Предложенный в работе алгоритм поиска установившихся режимов предусматривает автоматическое изменение параметров метода решения ДУ непрерывной части в случае, если заданная точность их ре-

шения не позволяет найти момент наступления установившегося режима с точностью, удовлетворяющей принятому критерию.

Программа поиска момента наступления установившегося режима состоит из трех частей: Simulink-модели исследуемой системы (разомкнутой), функции вычисления критерия наступления установившегося режима и функции, реализующей алгоритм поиска.

Разработанные методы анализа установившихся процессов в релейных и релейно-импульсных системах управления были опробованы на лабораторных макетах системы управления положением вала двигателя с релейно-импульсным управляющим устройством (рис. 10, а) и системы управления положением магнитного тела (рис. 10, б).

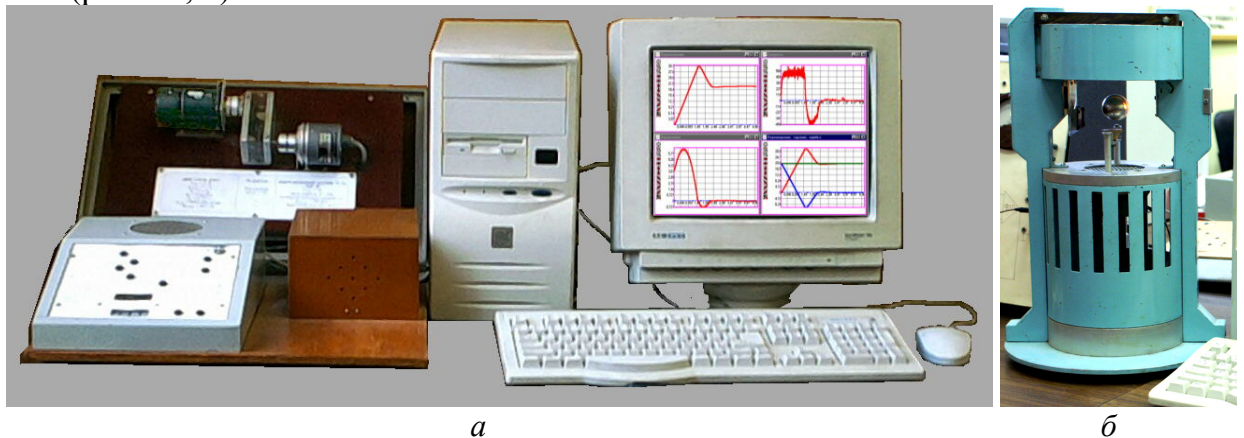


Рис. 10. Фотографии макетов систем управления: положением вала двигателя (а), положением магнитного тела (б)

В системе управления положением магнитного тела датчик позволяет измерять положение тела только в вертикальной плоскости. Недостаток измерительной информации восполняется колебательным режимом работы системы. На рис. 11, а показан график процесса в системе полученный путем расчета по предложенной методике. Результаты экспериментов с макетом подтвердили достоверность расчетных данных (рис. 11, б).

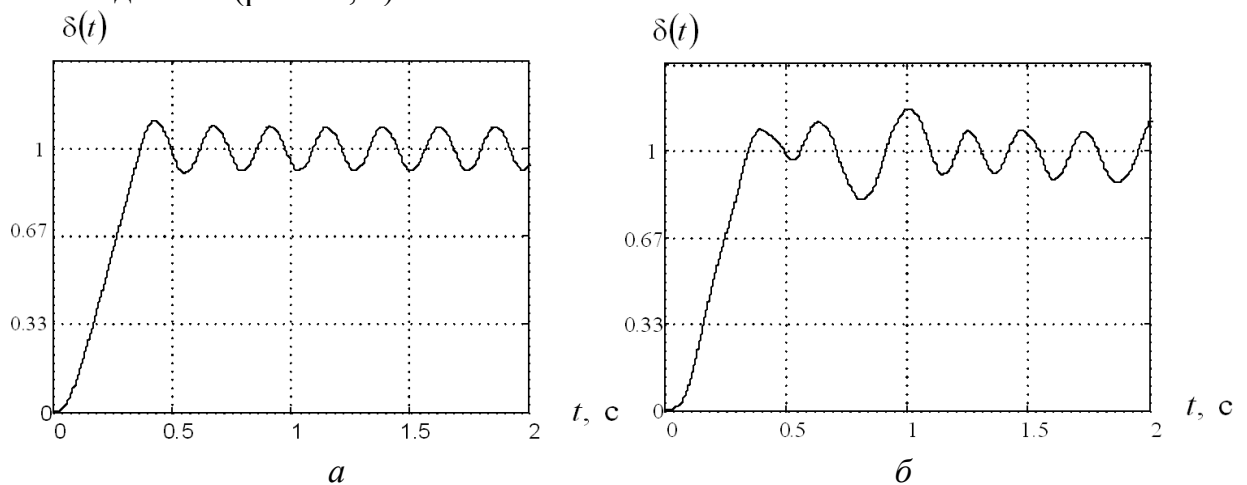


Рис. 11. Расчетный (а) и экспериментальный (б) графики процессов в системе управления положением магнитного тела

Разработанные модели и методы анализа также применялись при разработке системы управления электромеханическим следящим приводом антенного устройства, которая аналогична системе управления положением вала двигателя.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе получены научные и практические результаты, составляющие теоретическую, методическую и алгоритмическую основу анализа установившихся процессов в автоматических системах с релейными, релейно-импульсными и логическими алгоритмами управления на базе современных компьютерных технологий.

Гибридные модели, образованные взаимодействующими посредством интерфейса КА и непрерывными частями, упрощают программную и аппаратную реализацию алгоритмов, открывают путь для развития новых, более эффективных методов расчета и компьютерного моделирования релейно-импульсных автоматических систем управления.

Методы анализа равновесных и периодических режимов в релейно-импульсных и логических системах являются принципиально точными, так как гибридные модели позволяют выделить переменные, формы колебаний которых удастся перечислить путем анализа замкнутых маршрутов в графах переходов автоматов, СХ релейных преобразователей и замкнутых систем.

Метод уточнения параметров колебаний реализован в виде компьютерной версии прямых методов теории дифференциальных уравнений, базирующейся на идее подстановки в компьютерные модели функций-кандидатов на искомые решения. Автоматизированная процедура сводится к генерированию сигналов заданной формы, идентификации установившихся реакций разомкнутых систем и минимизации невязки подстройкой параметров.

Разработанные в рамках диссертационной работы гибридные и однородные модели, методы, алгоритмы и программы анализа равновесных режимов и периодических процессов в релейных, релейно-импульсных и логических системах образуют автоматизированный комплекс, позволяющий исследовать системы с логическими алгоритмами управления на основе малой информации о состоянии объектов и при недостаточном разнообразии уровней управляющих воздействий. Специализированная объектно-ориентированная программная реализация релейных и релейно-импульсных преобразователей с многозначными характеристиками, позволяет минимизировать вычислительные затраты и использовать преобразователи в системах реального времени.

Результаты исследований на тестовых примерах, а также экспериментальные данные, полученные на лабораторном макете релейно-импульсной системы управления положением вала двигателя и макете системы управления положением магнитного тела, позволяют сделать вывод об эффективности разработанных методов анализа и методик их применения.

Дальнейшие исследования и разработки по теме диссертации целесообразно проводить в направлении развития методов синтеза релейно-импульсных и логических алгоритмов управления.



Автор выражает благодарность проф. В. Б. Яковлеву, который обратил его внимание на перспективность исследований в области гибридных систем управления, своему научному руководителю проф. Н. Н. Кузьмину, а также проф. Д. Х. Имаеву и доц. Н. В. Соловьеву, за постоянную помощь в процессе работы над диссертацией.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Гаврилова, А. С. Wavelet-фильтрация в задаче вычисления скорости по данным унитарно-кодowego датчика / А.С. Гаврилова, Т.В. Туренко // Управление и информационные технологии: материалы Всерос. науч. конф., г. Санкт-Петербург, 3 – 4 апреля. 2003 г. – М.: Испо-сервис, 2003. – Т. 2. – С.88–92.

2. Гайдучок, С. Н. Высокоточная позиционная система управления регулирующим клапаном газотурбинной установки на базе частотно-регулируемого асинхронного двигателя / С. Н. Гайдучок, Н. В. Соловьев, Т. В. Туренко // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике (ИТЭЭ-2002): материалы IV всерос. науч.-техн. конф., Чебоксары, 5 – 6 июня 2002 – Чебоксары: Изд-во Чуваш. гос. ун-та им. И.Н.Ульянова, 2002. – С. 215-223.

3. Имаев, Д. Х. Гибридные модели систем с релейными управляющими устройствами / Д. Х. Имаев, Т. В. Туренко // Управление и информационные технологии (УИТ-2005): материалы III Всерос. науч. конф., г. Санкт-Петербург, 30 июня-2 июля 2005 г. – СПб.: СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2005. – Т.1. – С. 85-92.

4. Имаев, Д. Х. Анализ периодических режимов в релейных системах управления по гибридным моделям / Д. Х. Имаев, Н.Н. Кузьмин, Т. В. Туренко // Управление и информационные технологии (УИТ-2006): материалы IV Всерос. науч. конф., г. Санкт-Петербург, 10–12 октября 2006 г. – СПб.: СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2006. – С. 64–70.

5. Имаев, Д. Х. Гибридные модели систем с релейно-импульсными управляющими устройствами // Д. Х. Имаев, Т. В. Туренко // Управление и информационные технологии (УИТ-2006): материалы IV Всерос. науч. конф., г. Санкт-Петербург, 10–12 октября 2006 г. – СПб.: СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2006. – С. 70-76.

6. Кузьмин, Н. Н. Информационные технологии в задаче автоматизированного исследования систем прямого цифрового управления // Н. Н. Кузьмин, Н. В. Соловьев, Т. В. Туренко // Управление и информационные технологии: материалы Всерос. науч. конф., г. Санкт-Петербург, 3 – 4 апреля. 2003 г. – М.: Испо-сервис, 2003. – Т. 1. – С.310–315.

7. Соловьев, Н. В. Лабораторный стенд системы прямого цифрового управления / Н.В. Соловьев, Т.В. Туренко // Современные технологии обучения: материалы VIII междунар. конф. , г. Санкт-Петербург, 24 апреля 2002 г. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2002. – Т. 2. – С. 43-45.

8. Туренко, Т.В. Применение SIMULINK и STATEFLOW для моделирования гибридной системы прямого цифрового управления с унитарно-кодowym датчиком / Т. В. Туренко // Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB: труды Всерос. науч. конф., г. Москва, 28–29 мая 2002 г. – М.:ИПУ РАН, 2002 г. – Т. 5. – С. 694-705.

9. Соловьев, Н. В. Разработка технических и программных средств для многофункциональных стендов обеспечения учебного процесса по группе дисциплин учебного плана направления "Автоматизация и управление" / Н. В. Соловьев, Т. В. Туренко // Современные технологии обучения: материалы VIII междунар. конф., г. Санкт-Петербург, 24 апреля 2002 г. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ". – 2002. – Т. 2. – С. 41-43.

10. Туренко, Т. В. Гибридная модель системы прямого цифрового управления с унитарно-кодовым датчиком // Навигация и управление движением: сб. докл. IV конференции молодых ученых, г. Санкт-Петербург, 12–14 марта. 2002 г. – СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ "Электроприбор", 2002. – С.211–217.

11. Туренко, Т. В. Нечеткий регулятор в гибридной позиционной системе прямого цифрового управления // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям "SCM'2002": сб. докл., г. Санкт-Петербург, 25-27 июня. 2002 г. – СПб.: Изд-во Гидрометеиздат, 2002. – Т. 1. – С. 214-217.

12. Пат. на ПМ 34262 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 05 B 15/02, G 05 D 3/20. Электромеханический следящий привод антенного устройства / В.Д. Лебедев, В. А. Федотов, Ю. А. Шаповалов, Т. В. Туренко; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Центральный научно-исследовательский институт "Гранит". – 2003121139/20; заявл. 16.07.2003; опубл. 27.11.2003, Бюл. № 33.

13. Пат. 2253889 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 05 B 15/02, G 05 D 3/20. Электромеханический следящий привод антенного устройства / В. Д. Лебедев, В. А. Федотов, Ю. А. Шаповалов, Т. В. Туренко; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Центральный научно-исследовательский институт "Гранит". – 2003121589/09; заявл. 16.07.2003; опубл. 10.06.2005, Бюл. № 16.

14. Свид. на ПМ 25104 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 05 B 15/00. Гибридная электромеханическая система прямого цифрового управления / С. Н. Гайдучок, Ю. В. Королев, Н. В. Соловьев, Т. В. Туренко; заявители и патентообладатели С. Н. Гайдучок, Ю. В. Королев, Н. В. Соловьев, Т. В. Туренко. – 2002112068/20; заявл. 05.07.2007; опубл. 10.09.2002, Бюл. № 25.

15. Соловьев, Н. В. Лабораторный стенд для исследования характеристик шагового двигателя / Н. В. Соловьев, Т. В. Туренко // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ" (Известия Государственного электротехнического университета). Сер. Информатика, управление и компьютерные технологии. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2002. – Вып. 3. – С. 100-106.

16. Туренко, Т. В. Применение объектно-ориентированного программирования при моделировании гибридной электромеханической системы // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ" (Известия Государственного электротехнического университета). Сер. Информатика, управление и компьютерные технологии. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2002. – Вып. 2. С. 29-32.

17. Туренко, Т. В. Программное обеспечение автоматизированного лабораторного стенда // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ" (Известия Государственного электротехнического университета). Сер. Информатика, управление и компьютерные технологии. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2002. – Вып. 3. С. 32–39.

---

Подписано в печать 11.04.07 Формат 60x84 1/16  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 1,0.  
Тираж 100 экз. Заказ № 15

---

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии Издательства СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5