

УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

**Угаров Владимир Васильевич**

**КОМПЬЮТЕРНЫЕ МОДЕЛИ И ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ В  
ПРОЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОМ ОБУЧЕНИИ**

Специальность 05.13.18 — математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ**  
доктор технических наук,  
профессор Семущин И. В.

Ульяновск — 2005

# Содержание

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Введение</b>   | <b>5</b>  |
| <b>Глава 1 Возможности компьютерных моделей и технологий в преподавании</b>   | <b>15</b> |
| 1.1   | 15        |
| 1.2   | 15        |
| 1.3   | 15        |
| 1.4   | 15        |
| 1.5   | 15        |
| 1.6   | 15        |
| 1.7   | 15        |
| <b>Глава 2 Модели предметной среды</b>  | <b>16</b> |
| 2.1 Название...   | 17        |
| 2.2 Задача идентификация линейных моделей для стохастических систем управления  | 17        |
| 2.3 Задача идентификация линейных моделей для стохастических систем управления  | 17        |
| 2.4 Задача идентификация линейных моделей для стохастических систем управления  | 19        |
| <b>Глава 3 Решение задач управления и оценивания в классе дискретных стохастических систем</b>                                | <b>20</b> |
| 3.1 Идентификация линейных стохастических моделей   | 21        |
| 3.1.1 Алгоритм минимизации вспомогательного функционала первого порядка для идентификации моделей линейных системы управления | 21        |
| 3.2 Идентификация линейных стохастических моделей   | 21        |
| 3.2.1 Алгоритм минимизации вспомогательного функционала первого порядка для идентификации моделей линейных системы управления | 21        |

|                |   |           |
|----------------|---|-----------|
| 3.3            | Идентификация линейных стохастических моделей . . . . .   | 22        |
| 3.3.1          | Алгоритм минимизации вспомогательного функционала первого порядка для идентификации моделей линейных системы управления . . | 22        |
| 3.4            | Идентификация линейных стохастических моделей . . . . .   | 22        |
| 3.4.1          | Алгоритм минимизации вспомогательного функционала первого порядка для идентификации моделей линейных системы управления . . | 22        |
| 3.5            | Идентификация линейных стохастических моделей . . . . .   | 23        |
| 3.5.1          | Алгоритм минимизации вспомогательного функционала первого порядка для идентификации моделей линейных системы управления . . | 23        |
| <b>Глава 4</b> | <b>Математическое моделирование</b>   | <b>24</b> |
| 4.1            | Итерационный стохастический алгоритм управления . . . . .   | 24        |
| 4.1.1          | Стохастические линейные системы управления - задачи и условия проведения численных экспериментов . . . . .                  | 24        |
| 4.2            | Итерационный стохастический алгоритм управления . . . . .   | 24        |
| 4.2.1          | Стохастические линейные системы управления - задачи и условия проведения численных экспериментов . . . . .                  | 24        |
| 4.3            | Итерационный стохастический алгоритм управления . . . . .   | 24        |
| 4.3.1          | Стохастические линейные системы управления - задачи и условия проведения численных экспериментов . . . . .                  | 24        |
| 4.4            | Итерационный стохастический алгоритм управления . . . . .   | 25        |
| 4.4.1          | Стохастические линейные системы управления - задачи и условия проведения численных экспериментов . . . . .                  | 25        |
| 4.5            | Итерационный стохастический алгоритм управления . . . . .   | 25        |
| 4.5.1          | Стохастические линейные системы управления - задачи и условия проведения численных экспериментов . . . . .                  | 25        |
| 4.6            | Итерационный стохастический алгоритм управления . . . . .   | 25        |
| 4.6.1          | Стохастические линейные системы управления - задачи и условия проведения численных экспериментов . . . . .                  | 25        |
| 4.7            | Итерационный стохастический алгоритм управления . . . . .   | 25        |

|   |  |           |
|---|--|-----------|
| 4.7.1   | Стохастические линейные системы управления - задачи и условия проведения численных экспериментов . . . . . | 26        |
| 4.8   | Итерационный стохастический алгоритм управления . . . . .  | 26        |
| 4.8.1   | Стохастические линейные системы управления - задачи и условия проведения численных экспериментов . . . . . | 26        |
| 4.9   | Итерационный стохастический алгоритм управления . . . . .  | 26        |
| 4.9.1   | Стохастические линейные системы управления - задачи и условия проведения численных экспериментов . . . . . | 26        |
| 4.10  | Итерационный стохастический алгоритм управления . . . . .  | 26        |
| 4.10.1  | Стохастические линейные системы управления - задачи и условия проведения численных экспериментов . . . . . | 26        |
| <b>Заключение</b>   |  | <b>27</b> |
| <b>Литература</b>   |  | <b>32</b> |
| <b>Список иллюстраций</b>                                     |  | <b>43</b> |
| <b>Список таблиц</b>  |  | <b>44</b> |
| <b>Приложение А. Постановки задач численных экспериментов</b> |  | <b>45</b> |
| A.1   | Опыт... . . . . .  | 45        |
| A.2   | Опыт... . . . . .  | 45        |
| <b>Приложение В. Постановки задач численных экспериментов</b> |  | <b>47</b> |
| B.1   | Опыт... . . . . .  | 47        |
| B.2   | Опыт... . . . . .  | 47        |
| <b>Приложение С. Акты внедрения</b>                           |  | <b>49</b> |
| C.1   | Акт... . . . . .   | 49        |
| C.2   | Акт... . . . . .   | 49        |
| C.3   | Акт... . . . . .   | 49        |

## Введение

I know Prof. Innokenti V. Semoushin since July 1999 when he attended the 3rd European Conference on Numerical Mathematics, ENUMATH-99, held in Jyvaskyla, Finland. Immediately, we started a cooperation plan between the Telecommunications Programme in the Department of Mathematical Information Technology, University of Jyvaskyla, Finland and the Department of Mathematical Cybernetics and Informatics, Ulyanovsk State University, Russia, where I paid a research visit in November 1999. A group of three students from his department came to study and write their MSc theses in my department in the period 1.03 - 31.05.2000. This summer, a group of two students from his department attended a series of courses in applied mathematics held in the Jyvaskyla Summer School (30.07 - 17.08.2001) and with this occasion, further research topics were planned for our future cooperation. Функционирование многих динамических систем должно быть организовано при наличии неопределенностей в их математических моделях. Некоторые неопределенности могут быть представлены как неустранимые случайные процессы внешних воздействий на систему, имеющие заданные характеристики, другие требуют представления в виде устранимых параметрических неопределенностей. Это означает, что некоторые числовые характеристики (параметры) модели не заданы и/или могут непредвиденно изменить свои величины с одних значений, условно названных "номинальными", на другие, называемые "аномальными", которые теоретически могут быть оценены. Такое изменение называют возможным модельным нарушением.

В то же время и в этих условиях возможных нарушений требуется поддерживать высокое качество функционирования системы. Иногда для этого достаточно своевременно обнаружить, идентифицировать и парировать нарушение. В некоторых же (аварийных) режимах нужно хотя бы предотвратить катастрофическое развитие ситуации.

Особо сложным является решение этой проблемы в замкнутых системах стохастического управления. Здесь процессы управления, обнаружения, идентификации и парирования должны протекать одновременно. В какой степени это снижает качество функционирования по сравнению с режимом оптимального стохастического управления без нарушений, должно быть ясно до реального создания системы, чтобы еще на этапе ее

проектирования на каждую возможную ситуацию нарушения предусмотреть необходимые меры. В связи с этим актуальна проблема реализуемости оценки показателя качества функционирования, которая может быть решена с помощью вспомогательных, косвенных и обобщенных показателей при отсутствии доступа к прямым показателям.

Процесс управления необходимо организовать так, чтобы было возможным уменьшение априорных неопределенностей вектора параметров, характеризующих процесс, на основе последовательных наблюдений входных и выходных сигналов. При этом неизбежные потери качества функционирования системы должны быть сведены к минимуму. Теория адаптивных систем управления направлена на решение подобных задач [24], [69], [44].

Под *адаптивным* управлением понимаются процессы изменения параметров системы и управляющих воздействий на основе текущей информации для достижения *оптимального* качества показателей системы в условиях начальной неопределенности и изменения характеристик среды [62]. Из понятия адаптивного управления вытекает необходимость в построении одновременно протекающих процессов *идентификации* параметров модели, *принятия решения* об адекватности модели наблюдаемым измерениям и *модификации* системы на основе накопленной информации о текущем режиме [61].

Методы принципа *пассивной* адаптации, в котором статистические оценки неизвестных параметров определяются в режиме работы модели без обратной связи, не удовлетворяют указанному выше требованию оптимальности функционирования системы. Решения, предложенные Андерсоном, Мехрой, Челпанова и другими [70], [104], [103], [64] основаны на поиске стратегии управления по заранее расчетным соотношениям, которые теоретически должны приводить к улучшению функционирования. Байесовский подход, методы расширенной и аналитической моделей относятся к принципу пассивной адаптации. К достоинствам пассивных методов можно отнести возможность аппроксимации байесовских стратегий и более высокую скорость сходимости по сравнению с активными методами. Сильная зависимость решения от контролируемой и настраиваемой части системы, необходимость линеаризации, отсутствие функционального контроля за качеством адаптации приводит к ограничению решаемых классов задач.

*Активная* адаптация основана на слежении непосредственно за критерием качества

функционирования или за косвенными показателями оптимальности. Стратегия адаптации обеспечивает улучшение качества работы системы в каждый момент времени, что обеспечивается наличием обратной связи. Оптимизация параметров системы осуществляется для текущей реализации процессов без средних оценок характеристик исходных моделей. Существующие методы активной адаптации, разработанные Цыпкиным, Красовским, Рутковским, Ядыкиным, Эйкхоффом, Льюнгом, Ландау, и многих других [63], [68], [67], требуют наличия состояния системы. Для моделей дискретных стохастических систем с зашумленными неполными измерениями это принципиально невозможно и методы могут быть использованы с существенными ограничениями на свойства решаемых задач.

Принцип активной адаптации был положен в основу работ Семушина, Поньрко [41], [42], [43], и Хемптона [87]. Основной идеей осуществления активной адаптации в классе дискретных стохастических систем является построение косвенного показателя качества функционирования системы и разработка метода вспомогательного наблюдаемого функционала, минимум которого достигается одновременно с исходным нереализуемым функционалом качества.

Расширение класса неопределенности в модели систем, снижение чувствительности к модельным нарушениям возможно после исследования влияния различных факторов как на качество управления системы в условиях возможных нарушений, так и на устойчивость и эффективность численных реализаций методов.

Для повышения качества переходных процессов адаптации, установившихся режимов необходимы теоретические исследования процедур идентификации параметров, методов контроля моментов нарушения моделей, оценка устойчивости существующих и предлагаемых алгоритмов, учет ограничений на значения параметров системы; формирование признаков, чувствительных к модельным нарушениям. Функционирование некоторых систем сопровождается неустранимыми нелинейными преобразованиями, что приводит к анализу задачи идентификации, обнаружения изменений и адаптации модели для случая нелинейного оценивания.

Научные исследования в этой области ведутся, но часто ограничиваются решением

отдельных задач, например, только задачи обнаружения или только задачи идентификации. Большая сложность проблемы вызывает разнообразие предлагаемых подходов и методов ее решения.

Целью диссертационной работы является разработка эффективных методов идентификации моделей стохастических систем, повышающих качество их функционирования в условиях параметрических нарушений. Основные задачи работы сформулированы и исследованы в общем виде, при этом ряд вопросов практического применения разработанных методов решены средствами математического моделирования и анализа различных задач, включая линейное стохастическое управление, оценивание в нелинейных системах, а также распределение и управление потоками данных в телекоммуникационных системах.

1. hlkK

2. hlkK

3. hlkK

- hlkK
- hlkK
- hlkK
- hlkK
- hlkK
- hlkK
- hlkK

4. hlkK

5. hlkK

6. hlkK

7. hlkK

- hlkK
- hlkK

- hlkK
- hlkK
- hlkK
- hlkK
- hlkK

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, одного приложения и списка литературы из 100 наименований источников отечественных и зарубежных авторов. По результатам данной диссертационной работы опубликовано 9 научных работ [15] - [19], [107], [120] - [122].

Глава 1 носит вводный, обзорный характер и обозначает источники реальных задач, исследованию которых посвящена диссертационная работа, а также основные группы методов, существующие в области оценивания, идентификации и обнаружения, для стохастических систем с возможными нарушениями.

Глава 2, *Совместно выполняемые процессы обнаружения, идентификации и парирования нарушений*, посвящена постановкам основных задач управления для дискретных во времени стохастических систем в условиях параметрической неопределенности, включая системы нелинейного оценивания и управления потоками в сетях. Определены задачи обнаружения нарушений, идентификации и адаптации стохастических моделей, сформулированы решаемые в диссертации теоретические и практические вопросы.

В разделе 2.1 ставится и обсуждается задача идентификации оптимального фильтра Калмана по экспериментальным данным функционирования линейной замкнутой стохастической системы управления.

Раздел 2.2 формулирует задачу нелинейного оценивания – одновременной идентификации параметров модели и подсистемы оценивания. Необходимость исследования особенностей нелинейной фильтрации в задачах адаптации диктуется наличием в некоторых системах управления неустранимых нелинейных частей (например, типа трехрежимного ограничителя, рассмотренного в главе математического моделирования).

Целью раздела 2.3 является постановка задачи скорейшего определения изменений

в системе и дальнейшая разработка подхода, основанного на статистической проверке гипотез о режиме функционирования системы.

Обобщающий для этой главы раздел 2.4 объединяет постановки вспомогательных задач, вводит понятия меры качества функционирования системы с возможными нарушениями и ставит задачу разработки так называемого  $F$ -оптимального алгоритма, который имеет наименьшие потери качества функционирования.

Таким образом, в главе 2 поставлены основные задачи диссертационной работы:

1. Предложить и построить метод обнаружения нарушений, идентификации и адаптации моделей дискретных стохастических систем для различного уровня параметрической неопределенности в модели.
2. На основе решения о существовании вспомогательного функционала, удовлетворяющего условиям этого раздела, разработать вычислительную схему для задачи нелинейного оценивания в классе дискретных стохастических моделей.
3. Исследовать вычислительный алгоритм в классах линейных стохастических моделей с обратной связью и моделей нелинейного оценивания при различных постановках задач (изменяются уровень априорной неопределенности, уровень сигнал-шума, запас устойчивости объекта, амплитуда нарушений).
4. Исследовать влияние нелинейной части фильтра на качество получаемых оценок при различных уровнях параметрической неопределенности в модели и условий задачи: уровень сигнал-шума, запас устойчивости объекта, амплитуда нарушений.
5. Разработать численный оптимальный алгоритм обнаружения изменений в линейных стохастических системах управления/оценивания в дискретном времени, гарантирующий минимальные потери качества управления.
6. Определить влияние каждой составляющей (время принятия решения, ошибки I-ого и II-ого родов, время идентификации, ошибка оценивания параметров модели) на функционал потерь  $J_F^{(P)}(\gamma^*)$ .
7. Найти зависимость между ошибками I-ого и II-ого рода и настраиваемых параметров алгоритма  $\gamma^* \in D_\gamma$ .

8. На основе экспериментального моделирования дать выводы по практической применимости подхода в части задачи нелинейного оценивания.
9. Определить "слабые" места предложенного метода и предложить дальнейшие возможные его модификации для улучшения качества получаемых оценок.
10. Определить мощность решающего правила, оценить зависимости между параметрами алгоритма и ошибками I-ого и II-ого рода.

Глава 3 – *Теоретическое исследование и обоснование метода вспомогательного функционала*. В этой главе проводится теоретическое исследование метода вспомогательного функционала для линейных стохастических систем, выводятся вычислительные алгоритмы для рассматриваемых в настоящей работе задач при различном уровне параметрической неопределенности. Доказывается теорема о применимости метода вспомогательного функционала для задачи нелинейного оценивания. Обосновывается алгоритм обнаружения изменений в линейных стохастических системах и окончательно выводится алгоритм для решения основной задачи. Делается вывод о характеристиках предложенного алгоритма, ставится вопрос о возможной модификации и использовании моделей чувствительности второго порядка для улучшения свойств алгоритма.

В разделе 3.1 последовательно представлены *модель субоптимального фильтра, модель чувствительности*, уравнения критерия устойчивости, оценка следующей итерации метода для адаптации линейной стохастической системы управления при различных уровнях параметрической неопределенности.

Влияние нелинейности на уравнения алгоритма для задачи нелинейного оценивания обсуждается в разделе 3.2 настоящей главы. Нелинейность представлена как в общем виде рядов *Вольтерра*, так и в конкретных представлениях, исследуемых в последующих главах.

Теоретические основы и алгоритм обнаружения изменений на основе наблюдений за линейной стохастической системой приведены в разделе 3.3. Рассматриваются два подхода: первый - одновременное использование множества конкурирующих фильтров, настроенных на конкретную гипотезу о нарушении, второй - использование одного адаптивного фильтра для определения наиболее значимой гипотезы, согласованной с текущими наблю-

дениями.

Вычислительная схема решения поставленной общей задачи одновременного обнаружения, идентификации и адаптации модели, построенная в разделе 3.4, используется далее на конкретных примерах и практических задачах для математического моделирования.

Глава 4 – *Управление потоком данных в телекоммуникационных сетях*. Содержит решение задачи оптимального распределения потока данных в сетях. Для сети передачи данных произвольной структуры моделями входящего и исходящего потоков данных выбран Пуассоновский случайный процесс, параметр интенсивности которого определяется матрицей ассоциированного с ним Марковского процесса. Задача состоит в нахождении такого распределения входящего потока данных во всех входящих в сеть узлах в терминах описываемых пуассоновскими процессами с интенсивностями, изменяющимися согласно марковской дискретной цепи - ММРР, для которого исходящий поток является оптимальным. Исходящий поток определяется внутренней и недоступной для наблюдения неопределенной, подверженной резким изменениям динамикой узлов сети, а также алгоритмами мультиплексирования данных, которые на практике являются статистическими и о характере работы которых имеется возможность судить только по исходящему из сети потоку данных. Оптимальность исходящего потока понимается в нескольких смыслах:

- наименее фрагментированный исходящий поток данных, который определяется как наименьшее среднее время отсутствия данных по всем исходящим узлам сети;
- наименьшая средняя задержка потока данных по всем исходящим узлам сети;
- наиболее равномерный по плотности исходящего потока данных.

Сеть передачи данных представлена моделью "черного ящика" с некоторыми характеристиками моделей входящего и исходящего потоков данных, для аппроксимации которых к реальному потоку был теоретически выведен и практически реализован алгоритм определения параметров ММРР-модели. Алгоритм является частным случаем метода обобщенного отношения правдоподобия для ММРР-моделей.

Глава 5 – *Математическое моделирование*. В этой главе представлены результаты математического моделирования, в которых исследуются практические особенности пред-

ложенных методов. Определяется поведение алгоритма при различных условиях вычислительного эксперимента, исследуется влияние ряда факторов (уровень априорной неопределенности, отношение сигнал-шум, количество итераций, размерность задачи, начальное приближение оцениваемого параметра, параметры алгоритмов адаптации, запас устойчивости объекта). Оценивается степень влияния нелинейности на характеристики метода на основе сравнения результатов математического моделирования для задач линейной и нелинейной фильтрации. Экспериментально устанавливается практическая значимость и применимость предложенного в работе подхода к основной задаче скорейшего обнаружения изменений в системе и адаптации модели к новым условиям ее функционирования. Для этого проводится сравнение между функционированием "идеального" алгоритма и *F*-оптимального.

В разделе 5.1 рассматривается задача идентификации оптимального фильтра Калмана в рамках функционирования линейных стохастических моделей систем управления.

Случай нелинейной фильтрации, – влияние нелинейности, сравнение с линейной фильтрацией, – анализируется в разделе 5.2. На основе экспериментальных результатов показана применимость метода также и для более сложного случая нелинейной фильтрации в практических задачах оценивания.

Результаты моделирования и сравнения методов обнаружения изменений в динамических системах на основе наблюдаемых данных (раздел 5.3 настоящей главы) указывают на преимущество предлагаемого статистического подхода в исследуемых задачах последовательной обработки измерений.

Моделирование процессов распределения потоков данных в телекоммуникационных сетях, полученные результаты, выводы и открытые вопросы приведены в разделе 5.4.

Экспериментальное подтверждение теоретического решения основной задачи, ответ на вопрос о применимости метода, достигаемом качестве его функционирования, влиянии различных факторов, классе прикладных задач приведены далее в разделе 5.5.

Положения диссертационной работы, выносимые на защиту:

1. Принцип обучаемой статистической ортогональности как методологическая основа решения задач обнаружения нарушений, идентификации и адаптации моделей дис-

кретных стохастических систем управления для различного уровня параметрической неопределенности в модели.

2. Формирование вспомогательного функционала, удовлетворяющего требованиям адаптации по замкнутой схеме, и разработка вычислительной схемы для задачи нелинейного оценивания состояния дискретных стохастических систем.
3. Определение свойств вычислительного алгоритма в классах линейных стохастических систем управления и систем нелинейного оценивания при различных постановках задач (изменяются: уровень априорной неопределенности, уровень сигнал-шума, запас устойчивости объекта и амплитуда нарушений).
4. Количественные оценки нелинейной части фильтра на качество получаемых оценок при различных уровнях параметрической неопределенности в модели и изменении условий задачи: уровень сигнал-шума, запас устойчивости объекта и амплитуда нарушений.
5. Разработка численного оптимального алгоритма обнаружения изменений в линейных стохастических системах управления/оценивания в дискретном времени, гарантирующий минимальные потери качества управления.
6. Экспериментальное определение влияния каждой составляющей (время принятия решения, ошибки I-ого и II-ого рода, время идентификации, ошибка оценивания параметров модели) на функционал потерь  $J_F^{(P)}(\gamma^*)$ .
7. Эмпирические зависимости между ошибками I-ого и II-ого рода и настраиваемыми параметрами алгоритма обнаружения и определение мощности решающего правила.

# Глава 1 Возможности компьютерных моделей и технологий в преподавании

Настоящая глава носит вводный, обзорный характер и обозначает источники реальных задач, исследованию которых посвящена диссертационная работа, а также основные группы методов, существующие в области оценивания, идентификации и обнаружения в стохастических системах с возможными нарушениями.

## 1.1 ...

За это время появилось немало близких к СЕ подходов и понятий, например, CALS – Continuous Acquisition and Life-cycle Support (ранее известное как “Computer-aided Acquisition and Logistics Support”), IPPD – Integrated Product & Process Development, CPPD – Concurrent Product & Process Design, ERP – Enterprise Resource Planning<sup>1</sup> и другие, и постоянно появляются новые технологии проектирования и управления производством изделий. В настоящее время в мировой практике все они обозначаются обобщающим термином «Concurrent Engineering». “Международное Общество за Повышение Производительности”<sup>2</sup> имеет официальное издание в Academic Press – журнал «Concurrent Engineering: Research and Applications»<sup>3</sup> – авторитетный источник новой информации по компьютеризованным средствам в проектировании изделий, в их разработке и производстве, в автоматизации процессов на базе знаний, в сфере материально-технического обеспечения и в реализации параллельного инжиниринга и управления изделиями на протяжении жизненного цикла изделия.

fkfljhf;ikfg

---

<sup>1</sup> См. <http://www.acronymfinder.com/>.

<sup>2</sup> ISPE.

<sup>3</sup> <http://www.ceraj.com/>.

1.2 ...

1.3 ...

1.4 ...

1.5 ...

1.6 ...

1.7 ...

## Глава 2 Модели предметной среды

Настоящая глава посвящена исследованию метода наблюдаемого функционала в приложении к итерационной идентификации, управления и нелинейного оценивания в условиях параметрической неопределенности. Введены основные определения, даны постановки вспомогательных и основной задач. Под вспомогательными задачами мы понимаем задачи, представляющие собственный интерес для исследования: (1) параметрическая идентификация линейных моделей стохастических систем управления, (2) нелинейное оценивание в условиях модельных неопределенностей, (3) обнаружение изменений в линейных моделях систем. Основная задача состоит в построении оптимального метода управления стохастическими моделями с возможными нарушениями на основе совместно выполняемых процессов обнаружения, идентификации и парирования нарушений в системе.

В разделе 1.1 ставится и обсуждается задача идентификации оптимального фильтра Калмана в рамках функционирования линейных стохастических моделей систем управления.

Раздел 2.2 посвящен нелинейному оцениванию - одновременной идентификации параметров модели и подсистемы оценивания. Необходимость исследования особенностей нелинейной фильтрации в задачах адаптации диктуется наличием в некоторых системах управления неустранимых нелинейных частей (например типа трех-режимного ограничителя, рассмотренного в главе Глава 4).

Целью раздела 2.3 является постановка задачи скорейшего определения изменений в системе и дальнейшая разработка подхода, основанного на статистической проверке гипотез о режиме функционирования системы.

Основной в этой главе параграф 2.4 объединяет постановки вспомогательных задач, вводит понятия меры качества функционирования системы с возможными нарушениями и ставит задачу разработки  $F$ -оптимального алгоритма, который имеет наименьшие потери качества функционирования.

Решение поставленных в настоящей главе задач, а также результаты математического моделирования, выводы и дальнейшие возможные модификации предложенных в

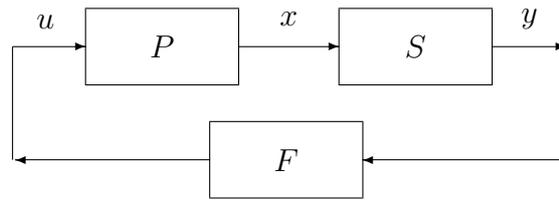


Рис. 2.1: Модель системы управления ( $MS$ ):  $P$  — объект управления ( $x$  - состояние системы),  $S$  — подсистема измерения,  $F$  — обратная связь

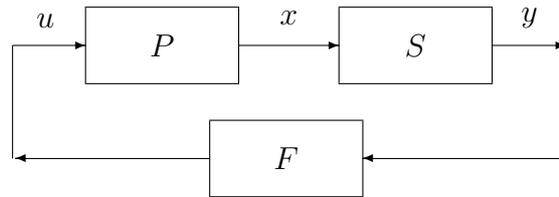


Рис. 2.2: Модель системы управления ( $MS$ ):  $P$  — объект управления ( $x$  - состояние системы),  $S$  — подсистема измерения,  $F$  — обратная связь

работе подходов вынесены в последующие главы работы.

## 2.1 Название...

Будем рассматривать ...

## 2.2 Задача идентификация линейных моделей для стохастических систем управления

Будем рассматривать ...

## 2.3 Задача идентификация линейных моделей для стохастических систем управления

Будем рассматривать ...

Таблица 2.1: Градиент of the negative log LF by Algorithm 1 and the “differentiated” KF

| $\tau$ , (sec.) | Algorithm 1, ( $y_1$ ) | “differentiated” KF, ( $y_2$ ) | $\ y_1 - y_2\ _\infty$ |
|-----------------|------------------------|--------------------------------|------------------------|
| 10              | -0.4275                | -0.4275                        | 0.0                    |
| 20              | -0.2149                | -0.2149                        | 0.0                    |
| 30              | 0.0038                 | 0.0038                         | 0.0                    |
| 40              | 0.0868                 | 0.0868                         | 0.0                    |
| 50              | 0.1102                 | 0.1102                         | 0.0                    |
| 60              | 0.1110                 | 0.1110                         | 0.0                    |
| 70              | 0.1038                 | 0.1038                         | 0.0                    |
| 80              | 0.0943                 | 0.0943                         | 0.0                    |

Таблица 2.2: Градиент of the negative log LF by Algorithm 1 and the “differentiated” KF

| $\tau$ , (sec.) | Algorithm 1, ( $y_1$ ) | “differentiated” KF, ( $y_2$ ) | $\ y_1 - y_2\ _\infty$ |
|-----------------|------------------------|--------------------------------|------------------------|
| 10              | -0.4275                | -0.4275                        | 0.0                    |
| 20              | -0.2149                | -0.2149                        | 0.0                    |
| 30              | 0.0038                 | 0.0038                         | 0.0                    |
| 40              | 0.0868                 | 0.0868                         | 0.0                    |
| 50              | 0.1102                 | 0.1102                         | 0.0                    |
| 60              | 0.1110                 | 0.1110                         | 0.0                    |
| 70              | 0.1038                 | 0.1038                         | 0.0                    |
| 80              | 0.0943                 | 0.0943                         | 0.0                    |

## 2.4 **Задача идентификация линейных моделей для стохастических систем управления**

Будем рассматривать ...

## Глава 3 Решение задач управления и оценивания в классе дискретных стохастических систем

В этой главе проводится теоретическое исследование метода вспомогательного функционала для линейных стохастических систем, выводятся вычислительные алгоритмы для рассматриваемых в настоящей работе задач при различном уровне параметрической неопределенности. Доказывается теорема о применимости метода вспомогательного функционала для задачи нелинейного оценивания. Обосновывается алгоритм обнаружения изменений в линейных стохастических системах и окончательно выводится алгоритм для решения основной задачи **P4**. Делается вывод о характеристиках предложенного алгоритма, ставится вопрос о возможной модификации и использовании моделей чувствительности второго порядка для улучшения свойств алгоритма.

В разделе 3.1 последовательно представлены *модель субоптимального фильтра, модель чувствительности*, уравнения критерия устойчивости, оценка следующей итерации метода для адаптации линейной стохастической системы управления при различном уровне параметрической неопределенности - постановка задачи **P1**.

Влияние блока нелинейности на уравнения алгоритма для задачи нелинейного оценивания обсуждается в разделе 3.2 настоящей главы. Нелинейность представлена как в общем виде рядов *Вольтерра*, так и в конкретных представлениях, исследуемых в последующих главах.

Теоретические основы и алгоритм обнаружения изменений на основе наблюдений за линейной стохастической системой приведены в разделе 3.3. Рассматриваются два подхода: первый - одновременное использование множества конкурирующих фильтров, настроенных каждый на “свою” гипотезу, второй - использование одного адаптивного фильтра для определения наиболее значимой гипотезы, согласованной с текущими наблюдениями.

Практическая значимость и применимость метода вспомогательного функционала к решению задачи одновременного обнаружения, идентификации и адаптации, а также характеристики полученного метода обсуждаются в главе 5.

### 3.1 Идентификация линейных стохастических моделей

Применение метода вспомогательного функционала к задаче идентификации линейных стохастических моделей управления, поставленной в главе 2.1, приводит к теоретическому исследованию получаемых алгоритмов идентификации и получению новых вычислительно эффективных подходов. В настоящей главе последовательно строятся численные методы адаптивного оценивания первого и второго порядков моделей систем управления.

#### 3.1.1 Алгоритм минимизации вспомогательного функционала первого порядка для идентификации моделей линейных системы управления

Пусть выполнены предположения и условия, указанные в разделе 2.1 для линейной стохастической модели управления (??), (??). Рассмотрим частный случай, относящийся ко второму уровню неопределенности...

### 3.2 Идентификация линейных стохастических моделей

Применение метода вспомогательного функционала к задаче идентификации линейных стохастических моделей управления, поставленной в главе 2.1, приводит к теоретическому исследованию получаемых алгоритмов идентификации и получению новых вычислительно эффективных подходов. В настоящей главе последовательно строятся численные методы адаптивного оценивания первого и второго порядков моделей систем управления.

#### 3.2.1 Алгоритм минимизации вспомогательного функционала первого порядка для идентификации моделей линейных системы управления

Пусть выполнены предположения и условия, указанные в разделе 2.1 для линейной стохастической модели управления (??), (??). Рассмотрим частный случай, относящийся ко второму уровню неопределенности...

### 3.3 Идентификация линейных стохастических моделей

Применение метода вспомогательного функционала к задаче идентификации линейных стохастических моделей управления, поставленной в главе 2.1, приводит к теоретическому исследованию получаемых алгоритмов идентификации и получению новых вычислительно эффективных подходов. В настоящей главе последовательно строятся численные методы адаптивного оценивания первого и второго порядков моделей систем управления.

#### 3.3.1 Алгоритм минимизации вспомогательного функционала первого порядка для идентификации моделей линейных системы управления

Пусть выполнены предположения и условия, указанные в разделе 2.1 для линейной стохастической модели управления (??), (??). Рассмотрим частный случай, относящийся ко второму уровню неопределенности...

### 3.4 Идентификация линейных стохастических моделей

Применение метода вспомогательного функционала к задаче идентификации линейных стохастических моделей управления, поставленной в главе 2.1, приводит к теоретическому исследованию получаемых алгоритмов идентификации и получению новых вычислительно эффективных подходов. В настоящей главе последовательно строятся численные методы адаптивного оценивания первого и второго порядков моделей систем управления.

#### 3.4.1 Алгоритм минимизации вспомогательного функционала первого порядка для идентификации моделей линейных системы управления

Пусть выполнены предположения и условия, указанные в разделе 2.1 для линейной стохастической модели управления (??), (??). Рассмотрим частный случай, относящийся ко второму уровню неопределенности...

### 3.5 Идентификация линейных стохастических моделей

Применение метода вспомогательного функционала к задаче идентификации линейных стохастических моделей управления, поставленной в главе 2.1, приводит к теоретическому исследованию получаемых алгоритмов идентификации и получению новых вычислительно эффективных подходов. В настоящей главе последовательно строятся численные методы адаптивного оценивания первого и второго порядков моделей систем управления.

#### 3.5.1 Алгоритм минимизации вспомогательного функционала первого порядка для идентификации моделей линейных системы управления

Пусть выполнены предположения и условия, указанные в разделе 2.1 для линейной стохастической модели управления (??), (??). Рассмотрим частный случай, относящийся ко второму уровню неопределенности...

## Глава 4 Математическое моделирование

В этой главе представлены результаты математического моделирования, в которых исследуются практические особенности предложенных методов. Определяется

### 4.1 Итерационный стохастический алгоритм управления

Рассмотрим следующие конкретные задачи адаптивного управления линейными стохастическими моделями с различным уровнем неопределенности в модели.

#### 4.1.1 Стохастические линейные системы управления - задачи и условия проведения численных экспериментов

...

### 4.2 Итерационный стохастический алгоритм управления

Рассмотрим следующие конкретные задачи адаптивного управления линейными стохастическими моделями с различным уровнем неопределенности в модели.

#### 4.2.1 Стохастические линейные системы управления - задачи и условия проведения численных экспериментов

...

### 4.3 Итерационный стохастический алгоритм управления

Рассмотрим следующие конкретные задачи адаптивного управления линейными стохастическими моделями с различным уровнем неопределенности в модели.

#### 4.3.1 Стохастические линейные системы управления - задачи и условия проведения численных экспериментов

...

#### **4.4 Итерационный стохастический алгоритм управления**

Рассмотрим следующие конкретные задачи адаптивного управления линейными стохастическими моделями с различным уровнем неопределенности в модели.

##### 4.4.1 Стохастические линейные системы управления - задачи и условия проведения численных экспериментов

...

#### **4.5 Итерационный стохастический алгоритм управления**

Рассмотрим следующие конкретные задачи адаптивного управления линейными стохастическими моделями с различным уровнем неопределенности в модели.

##### 4.5.1 Стохастические линейные системы управления - задачи и условия проведения численных экспериментов

...

#### **4.6 Итерационный стохастический алгоритм управления**

Рассмотрим следующие конкретные задачи адаптивного управления линейными стохастическими моделями с различным уровнем неопределенности в модели.

##### 4.6.1 Стохастические линейные системы управления - задачи и условия проведения численных экспериментов

...

#### **4.7 Итерационный стохастический алгоритм управления**

Рассмотрим следующие конкретные задачи адаптивного управления линейными стохастическими моделями с различным уровнем неопределенности в модели.

4.7.1 Стохастические линейные системы управления - задачи и условия проведения численных экспериментов

...

**4.8 Итерационный стохастический алгоритм управления**

Рассмотрим следующие конкретные задачи адаптивного управления линейными стохастическими моделями с различным уровнем неопределенности в модели.

4.8.1 Стохастические линейные системы управления - задачи и условия проведения численных экспериментов

...

**4.9 Итерационный стохастический алгоритм управления**

Рассмотрим следующие конкретные задачи адаптивного управления линейными стохастическими моделями с различным уровнем неопределенности в модели.

4.9.1 Стохастические линейные системы управления - задачи и условия проведения численных экспериментов

...

**4.10 Итерационный стохастический алгоритм управления**

Рассмотрим следующие конкретные задачи адаптивного управления линейными стохастическими моделями с различным уровнем неопределенности в модели.

4.10.1 Стохастические линейные системы управления - задачи и условия проведения численных экспериментов

...

## Заключение

В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1. Построен и исследован метод обнаружения нарушений, идентификации и адаптации моделей дискретных стохастических систем для различного уровня параметрической неопределенности в модели, использующий идею вспомогательного функционала качества и принцип “статистической ортогональности”;
2. Дано решение вопроса о существовании вспомогательного функционала и разработаны новый метод и вычислительная схема для задачи нелинейного оценивания в классе дискретных стохастических систем.
3. Детально проанализированы численные реализации метода адаптации в классе линейных стохастических систем с обратной связью и систем нелинейного оценивания при различных постановках задач (изменяются: уровень априорной неопределенности, уровень сигнал-шума, запас устойчивости объекта, амплитуда нарушений).
4. Определено влияние нелинейной части фильтра на качество получаемых оценок при различных уровнях параметрической неопределенности в модели и изменении конкретных условий задачи: соотношение сигнал-шум, запас устойчивости объекта.
5. Разработан новый численный *F*-оптимальный алгоритм обнаружения изменений в линейных стохастических системах управления/оценивания в дискретном времени.
6. Определено влияние каждой составляющей (время принятия решения, время идентификации, ошибка оценивания параметров модели) на функционал потерь.
7. Найдены зависимости между ошибками I-ого и II-ого рода и настраиваемых параметров решающего правила, определены мощность решающего правила и характер зависимости между параметрами алгоритма.

В целом, в работе проанализированы задачи и разработаны методы идентификации, адаптации и обнаружения нарушений при их совместной реализации с целью поиска адекватного наблюдением модельного представления в условиях параметрической неопределенности и предложены методы, итеративные схемы проектирования управления и оценивания в классе дискретных стохастических систем. Поставленная и решенная в работе

задача нахождения оптимальных режимов управления/оценивания и поддержания функционирования системы на гарантированном уровне для объектов с возможными нарушениями исследовалась при влиянии совокупности факторов, имеющих место в большинстве практических приложений. Решение поставленных задач включает в себя теоретические положения, детальное математическое моделирование (Глава 4) и выводы для каждого представленного эксперимента в работе.

Развернутые выводы по работе состоят в следующем:

1. В классе дискретных систем управления возможно построение оптимальных, в классе систем с возможными нарушениями, методов, при которых достигаются минимальные потери качества функционала управления системы. Метод нахождения оптимальных алгоритмов при различных условиях и постановках задач гарантирует качество управления, а также определяет условия, при которых достигнутое качество функционирования остается на заданном уровне.
2. Создание систем адаптивного управления в условиях априорной неопределенности о среде функционирования основано на совместных операциях обнаружения нарушений, идентификации адекватного представления модели и внесения модификаций в модель, осуществляемых в соответствии с принципом активной адаптации.
3. Возможность применения метода вспомогательного функционала для дискретных стохастических систем нелинейного оценивания теоретически доказана и численно исследована, выявлены особенности, учет которых позволяет при синтезе систем оценивания достигать гарантированного качества функционирования.
4. Исследование особенностей предложенных численных алгоритмов идентификации методами математического моделирования показало, что существенными препятствиями увеличению эффективности предлагаемых методов являются (1) присутствие нелинейных частей в постановке задачи, (2) экспоненциальное увеличение объема вычислений при увеличении размерности параметра неопределенности модели, (3) возможное смещение в получаемых оценках при неполном выборе параметра неопределенности в структуре модели. Выделение групп факторов и исследование их совместного влияния на качество получаемых оценок и на функционирование си-

стемы в целом позволяет определить условия применимости предлагаемого метода управления и условия, при которых возможно функционирование системы на заданном уровне.

5. Исследование зависимости ошибок I-ого и II-ого рода процедур обнаружения изменений в моделях систем как для случаев конечного множества возможных нарушений, так и для задачи с априорно неизвестным множеством нарушений, от параметров решающего правила и определенных в работе групп факторов позволяет находить лучшие в своем классе методы обнаружения нарушений.
6. Выявленные особенности метода обнаружения нарушений, основанного на идее вспомогательного функционала, в случае параметров неопределенности высокой размерности такие как *нечувствительность компонент вектора*, а также *эффект потери чувствительности*, связаны с применением модели чувствительности первого порядка относительно параметра  $\theta$ , что влечет необходимость использования моделей более высоких порядков.
7. Применимость предложенных в работе методов для различных уровней неопределенности определяется расположением параметра неопределенности в структуре модели. Теоретические и практические исследования показывают, что необходимо разделение пространства параметров  $\Omega_\theta$  для параметров неопределенности в части нелинейного оценивания и линейной части  $\Omega_\theta = \Omega_\theta^1 \times \Omega_\theta^2$  и поиск эффективных вычислительных схем минимизации функционала в пространствах  $\Omega_\theta^1$  и  $\Omega_\theta^2$  комбинированным методом проекции градиента и покоординатного спуска.
8. Предлагаемые в работе теоретически доказанные и практически значимые подходы и методы могут найти применение в задачах обработки сигналов в реальном времени, системах инерциального слежения, описываемых системами дифференциальных стохастических уравнений. Возможные приложения включают:
  - задачи обеспечения и поддержания качества управления в условиях неопределенностей функционирования объектов, включая такие “нетрадиционные” объекты как телекоммуникационные сети.

- “традиционные” объекты - системы инерциальной навигации и слежения
- задачи сейсмологии и обработки геофизических данных;
- задачи обнаружения изменения режимов работы систем и восстановление нормального функционирования - системы жизнеобеспечения;
- медико-биологические системы, распознавание ЭКГ и речевых сигналов;
- анализ экономических закономерностей и тенденций.

Основной целью разработанных методов и алгоритмов для дискретных стохастических систем является доказательство возможности решения задач управления/оценивания с минимальными потерями, которые позволяют системе достигнуть, в соответствии с ее функционалом, области наилучшего качества функционирования с учетом возможных нарушений. Научная значимость и практическая ценность работы состоят в решении совокупности вопросов новыми научными подходами в классе дискретных стохастических систем. Используемые принципы вспомогательного функционала и “статистической ортогональности” являются фундаментом для построения численных методов и исследования практических задач адаптивного стохастического управления и оценивания.

Вместе с тем настоящая работа не претендует на исчерпывающий охват всех аспектов поставленных проблем. В ходе теоретических и практических исследований в работе сформулированы вопросы, требующие, на взгляд автора, дальнейшего анализа, в том числе:

1. Исследование методов более высокого порядка в процедурах идентификации для улучшения характеристик процессов минимизации вспомогательного функционала. Методы должны быть основаны на преобразовании пространства параметров неопределенности и уменьшении взаимозависимости компонент вектора параметров.
2. Оценка влияния потерь, эффекта накопления ошибок и эффекта смещения на различных стадиях предлагаемого подхода на общее качество управления/оценивания в дискретных стохастических системах;
3. Определение применимости предложенных в работе методов к специфическим типам систем (например, наблюдатели Люенбергера, Хаддла, Новака, Ци и Атанса,

Иглхарта, Бреммера [60]), а также возможности распространения данного подхода на задачи обработки изображений.

## Список литературы

- [1] Александров А. Г., Оптимальные и адаптивные системы, — М.: Высш. шк., 1989.
- [2] Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности: Справочное издание Под ред. Айвазяна С. А. — М.: Финансы и статистика, 1989.
- [3] Алексеев А. Ю., Экало А. В. Множественная идентификация измерений состояния динамических объектов в условиях априорной неопределенности // Приборостроение. 1991. № 1. С. 3–8.
- [4] Анасов О. Л., Бутковский О. Я., Исакевич В. В. Выявление нестационарности случайно-подобных сигналов динамической природы // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40. № 2. С. 255–260.
- [5] Аоки М. Оптимизация стохастических систем. — М.: Наука, 1971.
- [6] Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем / Под ред. М. И. Бассвиль, А. В. Банвениста. — М.: Мир, 1989.
- [7] Бородкин Л.И., Моттль В.В. Алгоритмы обнаружения моментов изменения параметров уравнения случайного процесса. - Автоматика и телемеханика, 1976, № 6, с. 23-31.
- [8] Верулава Ю. Ш., Горгадзе З. Н., Поляк Б. Т. исследование алгоритмов оценивания коэффициентов авторегрессии // АиТ. 1984. № 11. С. 49–57.
- [9] Вовк А. И., Гришин Ю. П. Обнаружение моментов изменения свойств гауссовских марковских последовательностей и оценивание их параметров // Радиоэлектроника. 1991. Т. 34. № 7. С. 53–60.
- [10] Вонэм В. М. Стохастические дифференциальные уравнения в теории управления // Математика (период. сб. переводов иностр. статей). 1973. Т. 17. № 4. С. 129–167; № 5. С. 82–114.
- [11] Вальд А. Последовательный анализ. — М.: Физматгиз, 1960.

- [12] Гаджиев Ч. М. Проверка обобщенной дисперсии обновляющей последовательности фильтра Калмана в задачах динамического диагностирования // *АиТ*. 1994. № 8. С. 98–103.
- [13] Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. — М.: Наука, 1967.
- [14] Глушко А. Р. Применение метода моментов в решении задачи параметрической идентификации // *Приборостроение*. 1990. Т. 33. № 1. С. 56–62.
- [15] Горохов О.Ю., Итерационный алгоритм стохастического управления на основе наблюдаемого вспомогательного функционала // *Труды XXIV Конференции молодых ученых механико-математического факультета МГУ.* / Под редакцией Д.В. Георгиевского и А.Н. Якивчика, М. Издательство Центра прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ., сс. 56-59, (2002).
- [16] Горохов О.Ю., Метод вспомогательного функционала в задаче нелинейного оценивания // *Системний аналіз та інформаційні технології, Тези доповідей учасників IV Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених (1-3 липня 2002 р., м. Київ) / Уклад. Д.А. Пінчук. - К.: ІВЦ "Видавництво Політехніка", сс. 24-25., (2002).*
- [17] Горохов О.Ю., Идентификация моделей в условиях параметрической неопределенности // *Компьютерное и математическое моделирование в естественных и технических науках: Материалы IV Всероссийской научной internet-конференции (апрель-май 2002 года) / Гл. ред. серии проф. А.А. Арзамасцев, Тамбов: ИМФИ ТГУ им. Г.Р. Державина, 2002, вып. 17, сс. 16-19.*
- [18] Горохов О.Ю., Метод вспомогательного функционала для определения нарушений в динамических системах // *Проблемы теоретической кибернетики. Тезисы докладов XIII Международной конференции (Казань, 27-31 мая 2002 г.). Часть I / под редакцией О.Б. Лупанова. - М.: Изд-во центра прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ, 2002. С. 46.*
- [19] Горохов О.Ю., Метод вспомогательного функционала для построения моделей систем // *Материалы международного симпозиума "Надежность и качество - 2002",*

- Пенза, 2002, сс - 321-326.
- [20] Горский А.А. Автоматическая оптимальная фильтрация - Изв. АН СССР, ОТН, Энергетика и автоматика, 1962, № 5, с. 87-96.
- [21] Гришин Ю.П., Катиков В.М. Совместное обнаружение и оценивание случайных сигналов .- Зарубежная радиоэлектроника, 1977, № 6, С. 3-25.
- [22] Гриценко Н.С. и др. Оценивание параметров движения маневрирующих объектов. - Зарубежная радиоэлектроника, 1983, № 4, с. 3-30.
- [23] Гроп Д. Методы идентификации систем Пер. с англ. /Под ред. Е.И. Криенцкого.- М.: Мир, 1979.-302 с.
- [24] Деревицкий Д. П., Фрадков А. Л. Прикладная теория дискретных адаптивных систем управления — М.: Наука, 1981.
- [25] Демин Н. С., Жадан Л. И. Об оптимальности процедуры исключения аномальных измерений // Автометрия. 1983. № 4. С. 29–33.
- [26] Ершов А. А., Липцер Р. Ш. Робастный фильтр Калмана в дискретном времени // АиТ. 1978. № 3. С. 60–69.
- [27] Кендал М., Стюард А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. М.: Наука, 1976.
- [28] Клекис Э. А., Немура А. А. Последовательный критерий для обнаружения смещения последовательности обновления фильтра Калмана // Тр. АН Лит. ССР. Сер. Б. 1983. Т. 2 (135). С. 115–125.
- [29] Клигенс Н., Тельскинс Л. Методы обнаружения моментов изменения свойств случайных процессов . - Автоматика и телемеханика, 1983, № 10. С. 5-56.
- [30] Кузовков Н. Т., Карабанов С. В., Салычев О. С. Непрерывные и дискретные системы управления и методы идентификации. — М.: Машиностроение, 1978.
- [31] Лайниотис Д. Разделение — единый метод построения адаптивных систем. I. Оценивание. II. Управление // ТИИЭР. 1976. Т. 64. № 8. С. 8–27; С. 74–93.

- [32] Левин Б.Р., Шинаков Ю.С. Совместно оптимальные алгоритмы обнаружения сигналов и оценивания их параметров (обзор) .- Радиотехника и электроника, 1977, т. 22, № 11, с. 2239-2256.
- [33] Липейка А. К. Об определении момента изменения свойств авторегрессионной последовательности // Статистические проблемы управления. Вильнюс: Институт математики и кибернетики АН Лит. ССР, 1979. Вып. 39. С. 9–23.
- [34] Малютин Ю. М., Экало А. В. Применение ЭВМ для решения задач идентификации объектов. — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1988.
- [35] Мальцев А.А., Силаев А.М. Обнаружение скачкообразных изменений параметров и оптимальное оценивание состояния дискретных динамических систем .- Автоматика и телемеханика, 1985, № 1, с. 48-85.
- [36] Мироновский Л.А. Функциональное диагностирование динамических систем (обзор). — Автоматика и телемеханика, 1980, № 8, с. 96-121.
- [37] Немировский А. С. О рекуррентном оценивании параметров линейных объектов // АиТ. 1981. № 4. С. 77–86.
- [38] Никифоров И. В. Последовательное обнаружение изменения свойств временных рядов. — М.: Наука, 1985.
- [39] Никифоров И. В. Об оптимальности первого порядка алгоритма обнаружения разладки в векторном случае // АиТ. 1994. № 1. С. 87–104.
- [40] Острем К.Ю. Введение в стохастическую теорию управления Пер. с англ. // Под ред. Н.С. Райбмана. - М. Мир, 1973, - 322 с.
- [41] Поньрко С. А., Семушин И. В. Использование активного принципа при построении самонастраивающихся фильтров // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1971. № 1. с. 223–227.
- [42] Поньрко С. А., Семушин И. В. Построение обучающихся винеровских фильтров при ограниченном объеме априорной информации // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1971. № 5. с. 215–220.

- [43] Поньрко С. А., Семушин И. В. Схема идентификации марковской модели движения объекта // Изв. ВУЗов. Приборостроение. 1976. № 6. с. 30–33.
- [44] Растрингин Л. А. Адаптация сложных систем. - Рига: Зинатне, 1981 - 386 с.
- [45] Саридис Дж. Самоорганизующиеся стохастические системы управления. — М.: Наука, 1980.
- [46] Сейдж Э. П., Мелса Дж. Идентификация систем управления. — М.: Наука, 1974.
- [47] Семушин И. В. Активная адаптация оптимальных дискретных фильтров // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1975. № 5. с. 192–198.
- [48] Семушин И. В. Идентификация линейных стохастических объектов по неполным зашумленным измерениям вектора состояния // Автоматика и телемеханика. 1985. № 8. С. 61–71.
- [49] Семушин И. В. Эффективные алгоритмы обновления оценок по измерениям // Судостроительная промышленность, 1991, вып. 27, с. 55–62.
- [50] Семушин И. В. Адаптивное управление стохастическим линейным объектом в условиях неопределенности. Нелинейные динамические системы: качественный анализ и управление // Сб. тр. М.: ИСА РАН, 1994. Вып. 2. С. 104–110.
- [51] Семушин И. В. Построение активных схем адаптации управления с приложением к инерциальным навигационным системам. Нелинейные динамические системы: качественный анализ и управление // Сб. тр. М.: ИСА РАН, 1994. Вып. 2. С. 110–115.
- [52] Семушин И. В. Спецтема. Дис. ... д-ра. техн. наук. — Л.: ЛИАП, 1987.
- [53] Семушин И. В. Использование активного принципа фильтрации нестационарных случайных процессов // Сб. тез. докл. III НТК. Новгород: Новгородский филиал ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина). 1968. С. 64.
- [54] Срагович В. Г. Адаптивное управление. — М.: Наука, 1981.
- [55] Аналитические самонастраивающиеся системы автоматического управления. под ред. В.В. Солодовникова .- Машиностроение, 1965 - 320 с.

- [56] Торговицкий И.Ш. Методы определения момента изменения вероятностных характеристик случайных величин.- Зарубежная радиоэлектроника, 1976, № 1, С. 3-52.
- [57] Уонэм М. Линейные многомерные системы управления. — М.: Наука, 1980.
- [58] Фомин С. И. Рекуррентное оценивание и адаптивная фильтрация. — М.: Наука, 1984.
- [59] Фомин В. Н., Фрадков А. Л., Якубович В. А. Адаптивное управление динамическими объектами, — М.: Наука, 1981.
- [60] Фильтрация и управления в динамических системах // Под ред. К.Т. Леондеса М.:Мир, 1980
- [61] Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. — М.: Наука, 1968.
- [62] Цыпкин Я. З. Оптимальные алгоритмы оценивания параметров в задачах идентификации // АиТ. 1982. № 12. С. 9–23.
- [63] Цыпкин Я. З. Оптимальная идентификация динамических объектов // Измерения, контроль, автоматизация: Науч.-техн. сб. обзоров. / ЦНИИТЭИ приборостроения. — М.: 1983. Вып. 3 (47). С. 47–60.
- [64] Челпанов И. Б. Оптимальная обработка сигналов в навигационных системах. - М.: Наука, 1967. -392с.
- [65] Ширяев А. Н. Статистический последовательный анализ. — М.: Наука, 1976.
- [66] Шумский А. Е. О декомпозиции нелинейных динамических систем // Кибернетика и вычислительная техника. 1989. Вып. 81. С. 44–50.
- [67] Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. Пер. с англ. / Под ред. Н.С. Райбмана. - М.: Мир, 1975. - 684 с.
- [68] Ядыкин И. Б., Афанасьев В. Н., Данилина А. Н., Данилин А. Б. Адаптивное управление сложными технологическими процессами.- Зарубежная радиоэлектроника, 1980, № 8, с. 3-25.

- [69] Якубович В. А. К теории адаптивных систем. - ДАН СССР, 1968, т. 182, № 3 с 518-521
- [70] Anderson W. N. et al. Consistent estimates of the parameters of a linear system.- The Annals of Math. Stat., 1969, vol. 40, No. 6, p.2064-2075.
- [71] Astrom K.J., Eykhoff P. System identificaton - a survey. - In: Proc. IFAC Symp. on Identification and Process Parameter Estimation (Prague), 1970, p. 1-38.
- [72] Astrom K.J. Maximum likelihood and prediction error methods. -Automatica, Journal IFAC, 1980, vol. 16, No. 5, pp. 551-574.
- [73] Basseville M., Nikiforov I. V., Detection of Abrupt Changes: Theory and Application, Prentice-Hall, Englewoods Cliffs, NJ, 1993.
- [74] Basseville M., ‘On-board Component Fault Detection and Isolation Using the Statistical Local Approach’, Automatica, 34, No. 11, 1391–1415, (1998).
- [75] Bierman G. J. Factorization Methods For Discrete Sequential Estimation. — New York: Academic, 1977.
- [76] Bierman G. J., Belzer M. R., Vandercraft J. S., Porter D. W. Maximum Likelihood Estimation Using Square Root Information Filters // IEEE Trans. Automat. Contr. 1990. V. 35. No. 12. P. 1293–1299.
- [77] Cox H. On the Estimation of State Variables and Parameters for Noisy Dyanamic Systems -. IEEE Trans. Automatic Control, 1964, AC-4(1), pp. 5-12
- [78] Gibson J.E. Non-linear Automatic Control.- New York: McGraw-Hill, 1962, Chap. 11.
- [79] Grauppe D., Krause D.J., Cline W.K. Identification of Kalman-Bucy Filters from noisy measurements arrays. Int.J.System SCI, 1973, vol. 4, No. 5, pp. 739-756.
- [80] Dyer P., McReynolds S. Extensions of Square Root Filtering to Include Process Noise // J. Opt. Theory Appl. 1969. V. 3. No. 6. P. 444–459.
- [81] Caines, P. E., Prediction error idenitification methods for stationary stochastic processes, IEEE Trans. Autom. Control, AC-21, 500-503 (1976).

- [82] Caines, P. E., Stationary linear and non-linear system identification and predictor set completeness, *IEEE Trans. Autom. Control*, AC-23(4), 583-594 (1978).
- [83] Caines, P.E. *Linear Stochastic Systems*; Wiley (pp. 874), (1988).
- [84] Eykhoff, P. *System Identification*; Wiley (pp. 684), (1974).
- [85] Farison J. B., Graham R.E., Shelton R.C. *Identification and Control*, 1967, AC-12 (4), pp.438-442.
- [86] Frank P. M., Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy - a survey and some new results, (Survey paper), *Automatica* Vol. 26,3, p.459-474, May, 1990.
- [87] Hampton R. L. T. On unknown state-dependent noise, modeling errors, and adaptive filtering // *Comput. & Elect. Engng.* 1975. V. 2, P. 195–201.
- [88] Iosifescu M., *Finite Markov Processes and Their Applications*, John Wiley and Sons, New York, 1980.
- [89] Isermann R., New results on the identification of the processes *Automatica* Vol 7,2,p.191-197, March, 1971.
- [90] Isermann R., Process fault detection based on modelling and estimation methods - a survey"(Survey paper), *Automatica* Vol.20, 4, p.387-404, July, 1984.
- [91] Kushner H. J. A projected stochastic approximation method for adaptive filters and identifiers // *IEEE Trans. Automat. Contr.* 1980. V. AC-25. No. 4. P. 836–838.
- [92] Landau, I. D. *Identification Des Systems. Les Bases De L'Identification Des Systems* Ed. Hermes, Paris, 2001, 384 p.
- [93] Ljung, L. On Consistency for Prediction Error Identification method, Division of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, Report 7405, March (1974).
- [94] Ljung, L., Consistency of the least squares identification method, *IEEE Trans. Autom. Control*, AC-21, 779-781 (1976).

- [95] Ljung, L., On consistency and identifiability, *Mathematical Programming Studies*, no. 5, North Holland, Amsterdam, pp. 169-190 (1976).
- [96] Ljung, L. Convergence Analysis of Parametric Identification Methods; *IEEE Trans. Aut. Control*, Vol. AC-23, No. 5 (pp. 770–783) (1978)
- [97] Ljung, L. Convergence Analysis of Parametric Identification Methods; *IEEE Trans. Aut. Control*, Vol. AC-23, No. 5 (pp. 770–783) (1978)
- [98] Ljung, L. "On the estimation of the transfer functions" *Automatica* Vol.21, 6, p.677-696, November, 1985.
- [99] Maybeck P., *Stochastic Models, Estimation and Control*, Vol. 1, Academic Press, New-York, 1979.
- [100] Mendel J.M. *Discrete techniques of parameter estimation: The equation error formulation* -.N.Y.: Dekker, 1973.-322 p.
- [101] Myers K.A., Tapley B.D. Adaptive sequential estimation with unknown noise statistics .- *IEEE Trans. Automatic Control*, 1976, vol. AC-21, No. 4, pp. 520-523.
- [102] Medhi D., "Multi-Hour, Multi-Traffic Class Network Design for Virtual Path-Based Dynamically Reconfigurable Wide-Area ATM Networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.3, no. 6, pp. 809-818, 1995.
- [103] Mehra R. K. Approaches to adaptive filtering. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1972, vol. AC-17, No.5, p. 693-698
- [104] Mehra R. K., Peschon J. An innovation approach to fault detection and diagnosis in dynamic systems. - *Automatica, Journal IFAC*, 1971, vol. 7, p. 637-640.
- [105] Mosca E., *Optimal, Predictive and Adaptive Control*, Prentice-Hall, Englewoods-Cliffs, NJ, 1995.
- [106] Murgu A., *Optimization of Telecommunication Networks. Lecture Notes*, University of Jyv äskylä, 1999.

- [107] Murgu A., Gorokhov O. Yu., Semoushin I. V., Input-Output Statistical Inference of Switching Processes // *Фундаментальные проблемы математики и механики, Ульяновский госуниверситет*. Т.2, No.8 (выпуск в декабре 2000).
- [108] Nakajima, F., and Kozin, A characterization of consistent estimatos, *IEEE Trans. Autom. Control*, AC-24(5), 758-765 (1979).
- [109] Nguyen, V. V. and E.F. Wood Review and Unification of Linear Identifiability Concepts; *SIAM Review*, Vol. 24 (pp. 34–51) (1982).
- [110] Norris D.O., Snyder L.E. Consistency of least-squares estimates used in linear system identification .-*SIAM J. Contr.*, 1975, vol. 13, No. 6, pp.1183-1194.
- [111] Saridis, G.N. *Self-Organizing Control of Stochastic Systems*; Marcel Dekker, Inc. (pp. 400) (1977)
- [112] Schrama R. R., "Accurate identification for control: the necessity of an iterative scheme". *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 37(7), pp. 991–994 (1992).
- [113] Segen J., Sanderson A. Detecting change in time series // *IEEE Trans. Inform. Theory*. 1980. V. IT-26. No. 2. P. 250-355.
- [114] Sinha A.K. Adaptive Kalman filtering using stochastic approximation .-*Electron. Lett.*, 1973, No. 9, pp. 177-178.
- [115] Tsypkin, Ya. Z., E.D. Avedyan and O.V. Gulinsky On Convergence of the Recursive Identification Algorithms; *IEEE Trans. Aut. Control*, Vol. AC-26, No. 5 (pp. 1009–1017) (1981)
- [116] Rittwik J., Subhrakanti D., "Change Detection in Teletraffic Models", in *Proceedings of the 36th IEEE CDC*, San Diego, pp. 3984-3
- [117] Semoushin I. V. and J. V. Tsyganova Indirect Error Control for Adaptive Filtering; (Proc. 3<sup>rd</sup> European Conference on Numerical Mathematics and Advanced Applications, ENUMATH-99, (eds. P. Neittaanmaki, T. Tiihonen and P. Tarvainen), World Scientific, Singapore (pp. 333-340), (2000)
- [118] Semoushin I. V., *Adaptive Identification and Fault Detection Methods in Random Signal Processing*, Saratov University Publishers, Saratov 1985.

- [119] Semoushin I. V., ‘On One Approach to Fault Detection in Linear Dynamical Systems with Possible Disturbances’, *Automatica and Computing Technics - Academy of Sciences of the Latvian SSR*, 4, 24–30, (1974).
- [120] Semoushin I. V. and Gorokhov O. Yu., *Computational Processes in Iterative Stochastic Control Design // Lecture Notes in Computer Science (LNCS 2329), Pt. 1*, Springer: Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hong Kong, London, Milan, Paris, Tokyo, pp.186-195, (2002).
- [121] Semoushin I.V. and Gorokhov O.Yu., *Learned Bank of Adaptive Filters for Change Detection and Isolation // Automation, Control, and Information Technology, ACTA Press: Anaheim, Calgary, Zurich*, pp.251-255, (2002).
- [122] Semoushin I.V., Gorokhov O. Yu., *Mixtures of Experts for Scenario Analysis Based on Batch of Kalman Filters //Труды четвертой международной научно-технической конференции "Математическое моделирование физических, экономических, технических, социальных систем и процессов"*, Ульяновск, 2001, С.60-61.
- [123] Tanaka S. *Diagnosability of systems and optimal sensor location in fault diagnosis in dynamic systems — Theory and Application*. Prentice Hall Intern. Series in Systems and Control. Eng. 1988. P. 155–188.
- [124] Basencon-Voda A.,Titiliuc M. *Issues on identification in closed-loop of induction motors ECC 2001, European Control Conference. Porto (Portugal), 2001*
- [125] Willsky A. S., "A survey of design methods for failure detection in dynamic systems"(Survey paper), *Automatica* Vol.12, 6, p.601-611, November, 1976.

## Список иллюстраций

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Модель системы управления ( $MS$ ): $P$ — объект управления ( $x$ - состояние системы), $S$ — подсистема измерения, $F$ — обратная связь . . . . .   | 17 |
| 2.2 | Модель системы управления ( $MS$ ): $P$ — объект управления ( $x$ - состояние системы), $S$ — подсистема измерения, $F$ — обратная связь . . . . .   | 17 |
| A.1 | Идентификация модели, эксперимент <b>E1</b> , 1-инерциальная система первого порядка (plant model), 2-объект слежения(reference model). Уровень неопределенности: $\theta = [Q]$ ковариация шумов в инерциальной системе . . . . .                       | 45 |
| A.2 | Идентификация модели, эксперимент <b>E1</b> 1-инерциальная система первого порядка (plant model), 2-объект слежения(reference model). Уровень неопределенности: $\theta = [Q, Q_r]$ ковариации шумов в инерциальной системе и объекте слежения . . . . . | 46 |

## Список таблиц

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Градиент of the negative log LF by Algorithm 1 and the “differentiated” KF . . | 18 |
| 2.2 | Градиент of the negative log LF by Algorithm 1 and the “differentiated” KF . . | 18 |
| B.1 | Градиент of the negative log LF by Algorithm 1 and the “differentiated” KF . . | 47 |
| B.2 | Градиент of the negative log LF by Algorithm 1 and the “differentiated” KF . . | 48 |

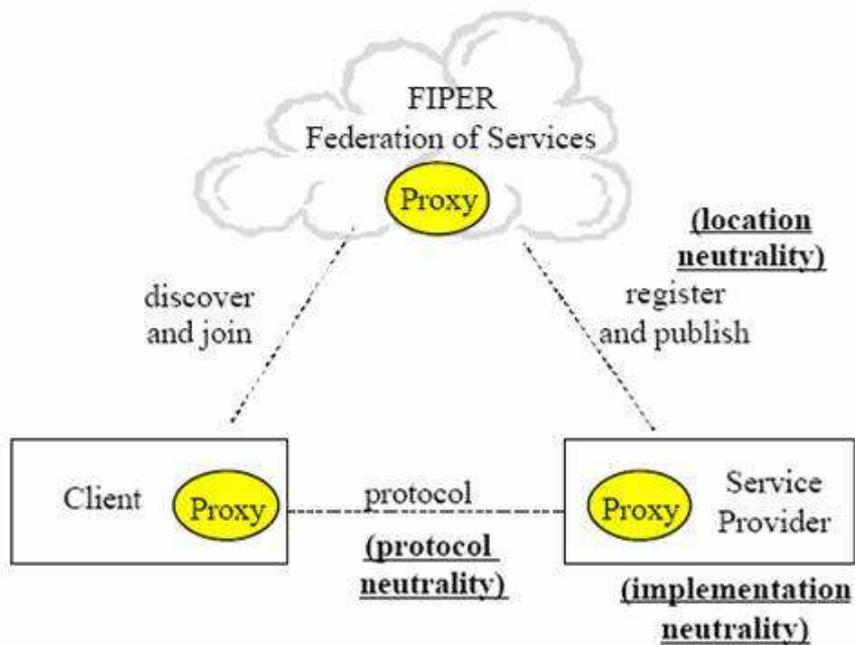


Рис. А.1: Идентификация модели, эксперимент **E1**, 1-инерциальная система первого порядка (plant model), 2-объект слежения(reference model). Уровень неопределенности:  $\theta = [Q]$  ковариация шумов в инерциальной системе

## Приложение А. Постановки задач численных экспериментов

В этом приложении приведены графики и таблицы экспериментального моделирования для следующих задач.

**А.1 Опыт...**

**А.2 Опыт...**

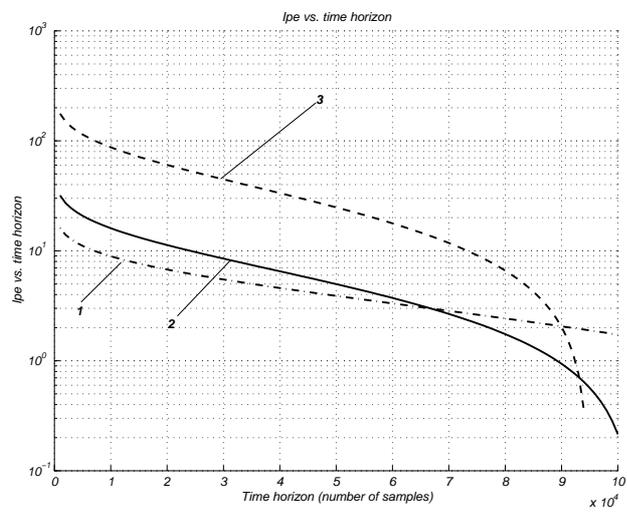


Рис. А.2: Идентификация модели, эксперимент **E1** 1-инерциальная система первого порядка (plant model), 2-объект слежения(reference model). Уровень неопределенности:  $\theta = [Q, Q_r]$  ковариации шумов в инерциальной системе и объекте слежения

## Приложение В. Постановки задач численных экспериментов

В этом приложении приведены графики и таблицы экспериментального моделирования для следующих задач.

### В.1 Опыт...

Таблица В.1: Градиент of the negative log LF by Algorithm 1 and the “differentiated” KF

| $\tau$ , (sec.)  | Algorithm 1, ( $y_1$ ) | “differentiated” KF, ( $y_2$ ) | $\ y_1 - y_2\ _\infty$ |
|--|------------------------|--------------------------------|------------------------|
| .gf,gf,jf,jdf,<br>gjd,gd,gd,j,<br>jgd,gd,ghd,<br>hf,ff,j a | s                      | d                              | s                      |
| 10   | -0.4275                | -0.4275                        | 0.0                    |
| 20   | -0.2149                | -0.2149                        | 0.0                    |
| 30   | 0.0038                 | 0.0038                         | 0.0                    |
| 40   | 0.0868                 | 0.0868                         | 0.0                    |
| 50   | 0.1102                 | 0.1102                         | 0.0                    |
| 60   | 0.1110                 | 0.1110                         | 0.0                    |
| 70   | 0.1038                 | 0.1038                         | 0.0                    |
| 80   | 0.0943                 | 0.0943                         | 0.0                    |

### В.2 Опыт...

Таблица В.2: Градиент of the negative log LF by Algorithm 1 and the “differentiated” KF

| $\tau$ , (sec.) | Algorithm 1, ( $y_1$ ) | “differentiated” KF, ( $y_2$ ) | $\ y_1 - y_2\ _\infty$ |
|-----------------|------------------------|--------------------------------|------------------------|
| 10              | -0.4275                | -0.4275                        | 0.0                    |
| 20              | -0.2149                | -0.2149                        | 0.0                    |
| 30              | 0.0038                 | 0.0038                         | 0.0                    |
| 40              | 0.0868                 | 0.0868                         | 0.0                    |
| 50              | 0.1102                 | 0.1102                         | 0.0                    |
| 60              | 0.1110                 | 0.1110                         | 0.0                    |
| 70              | 0.1038                 | 0.1038                         | 0.0                    |
| 80              | 0.0943                 | 0.0943                         | 0.0                    |

## Приложение С. Акты внедрения

В этом приложении приведены акты внедрения...

**С.1** Акт...

**С.2** Акт...

**С.3** Акт...