

На правах рукописи



**ЛАХОДЫНОВ ВИКТОР СЕРГЕЕВИЧ**

**МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗА  
НЕИЗМЕРЯЕМОЙ ПЕРЕМЕННОЙ СОСТОЯНИЯ  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА**

Специальность 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ

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

Томск – 2010

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научный руководитель –**

доктор технических наук, профессор  
Букреев Виктор Григорьевич

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор  
Дмитриев Вячеслав Михайлович  
(Томский государственный  
университет систем управления и  
радиоэлектроники)

доктор физико-математических наук,  
профессор Дмитриев Юрий Глебович  
(Томский государственный  
университет)

**Ведущая организация –**

ОАО «НПЦ «Полюс», г. Томск

Защита состоится 23 сентября 2010 г. в 15:15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.268.02 при Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 203.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники по адресу: 634045, г. Томск, ул. Вершинина, 74.

Автореферат разослан 20 августа 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Р.В. Мещеряков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Создание интеллектуальных систем управления сложными динамическими объектами предполагает использование достаточно точных математических моделей протекающих процессов, быстродействующих численных процедур и алгоритмов при ограниченных вычислительных ресурсах программно-аппаратных устройств обработки информации.

Для качественного решения задач информационного обеспечения при управлении многими динамическими объектами требуется информация о полном векторе состояния объекта. Однако в реальных системах непосредственное измерение всех переменных состояния объекта приводит либо к значительному усложнению датчиков и устройств преобразования сигналов, либо вовсе является недоступным. Так, например, получение достоверных данных о состоянии сложного электромеханического объекта, входящей в состав установки погружного центробежного насоса нефтяного оборудования или транспортного механизма, удаленных от источника энергии и системы управления, является практически невозможным. В подобных системах, для получения желаемой информации о протекающих процессах целесообразно использовать наблюдающее устройство (наблюдатель состояния), позволяющее не только оценивать неизмеряемые переменные состояния динамического объекта на основе измеряемых информационных сигналов, но и обеспечить прогноз этой оценки.

Решением проблемы оценивания неизмеряемых переменных состояния в задачах управления динамическими объектами занимаются отечественные и зарубежные исследователи: В.Н. Афанасьев, В.Б. Колмановский, В.Ю. Рутковский, Ю.А. Борцов, В.В. Путов, А. Isidori, К.М. Hangos, J. Bokor, G. Szederkenyi и др.

Основы теории оценивания и прогнозирования переменных состояния динамических объектов на основе временных рядов изложены в работах Б.П. Безручко, К.В. Воронцова, А.И. Орлова, Д.А. Смирнова, В.В. Стрижова. Значительный вклад в создание регрессионных моделей оценивания и прогнозирования осуществлен Г.М. Кошкиным, А.В. Добровидовым, В.А. Васильевым и др. Исследованием наблюдателей переменных состояния в таких электромеханических объектах, как электроприводы переменного тока, занимаются отечественные и зарубежные ученые: А.Д. Браславский, А.Б. Виноградов, В.В. Панкратов, P. Schroder, R. Kennel и др.

Из существующих методов построения моделей оценивания переменных состояния электромеханических объектов, наиболее перспективными являются методы, основанные на минимизации невязки функциональных характеристик объектов, в которых используются данные измеряемых и оцениваемых переменных. При использовании подобных моделей в системах управления современным высокопроизводительным оборудованием актуальными являются алгоритмы и вычислительные процедуры определения в реальном времени перенастраиваемых параметров контуров, обеспечивающих невязку функциональных характеристик объектов.

Во время восстановления неизмеряемой переменной состояния по моделям оценивания неизбежно возникает вычислительная задержка, поэтому для обеспечения устойчивого управления желательно получать данные о состоянии динамического объекта в режиме прогнозирования. Достаточно эффективным способом прогнозирования переменных состояния в цифровых системах управления могут служить модели временных рядов, представляющие собой упорядоченные во времени наборы дискретных данных.

Для качественного оценивания и прогнозирования переменных состояния нелинейного электромеханического объекта необходимо учитывать действие случайных внешних возмущений и наличие измерительных ошибок в каналах связи, которые практически всегда присутствуют в реальных условиях.

В соответствии с вышеизложенным, актуальным является построение в реальном времени эффективных моделей оценивания и прогнозирования переменных состояния нелинейного электромеханического объекта с учетом случайных внешних возмущений и шумов в измерительных каналах.

**Объект и предмет исследований.** Объектом исследований является электромеханический объект, обладающий свойствами нелинейности характеристик, а также стохастическими свойствами, связанными со случайными внешними воздействиями и шумами в каналах измерения.

Предметом исследования являются математические модели оценивания и прогнозирования неизмеряемых переменных динамического состояния электромеханического объекта.

**Цель работы.** Целью диссертационной работы является разработка и исследование оптимальных моделей оценивания и прогнозирования неизмеряемой переменной состояния электромеханического объекта со случайными помехами в каналах измерения.

**Задачи исследований.** Ставятся следующие задачи:

- обзор методов оценивания неизмеряемых переменных состояния динамического объекта;
- обзор методов прогнозирования переменных состояния стохастического объекта;
- синтез и исследование модели оптимальной оценки неизмеряемых переменных состояния электромеханического объекта;
- разработка алгоритма оптимизации параметров модели оценивания неизмеряемых переменных состояния;
- разработка и исследование модели оптимального прогнозирования переменных состояния;
- доказательство работоспособности разработанных моделей и алгоритмов с помощью вычислительных и натурных экспериментов;
- разработка комплекса программ для моделирования переменных состояния электромеханического объекта и экспериментальных исследований.

**Методы исследований.** При решении поставленных задач использовались методы теории дифференциальных уравнений, математической

статистики, теории вероятностей и случайных процессов, также использовались численные методы решения систем дифференциальных уравнений и методы оптимизации. Для моделирования и программной реализации разработанных алгоритмов использовались методы моделирования в среде MATLAB/SIMULINK, методы программирования в средах разработки C++ Builder и Code Composer Studio.

**Достоверность полученных результатов.** Достоверность результатов работы подтверждается математическим обоснованием разработанных моделей, сопоставимостью результатов теоретических исследований с существующими положениями теории вероятности и случайных процессов, сравнением результатов имитационного моделирования и экспериментальных исследований на испытательном стенде.

**Научная новизна.** Научная новизна заключается в следующем:

- разработана модель оценки неизмеряемой переменной состояния электромеханического объекта с оптимальным алгоритмом перенастройки ее параметров, позволяющая вычислить с приемлемой точностью неизмеряемую переменную состояния не только на установившихся режимах работы объекта, но и во время переходных процессов;
- предложена модель прогноза переменных состояния нелинейного электромеханического объекта на основе ядерных оценок регрессии, позволяющая вычислить оптимальную оценку значений переменных состояния при отсутствии априорной информации о распределении шумов в измерениях;
- разработаны алгоритмы оптимальной перенастройки параметров моделей оценки и прогноза переменных состояния электромеханического объекта, позволяющие вычислить их значения в режиме реального времени.

**Практическая ценность.** Практическая ценность работы заключается в следующем:

- разработаны программные модули в виде динамически подключаемых библиотек (на языке программирования C++), реализующие алгоритм оптимального оценивания частоты вращения асинхронного двигателя и алгоритм построения оптимальной регрессионной модели для прогнозирования;
- разработаны программные приложения (при помощи среды разработки C++ Builder) для оценивания частоты вращения асинхронного двигателя и прогнозирования его измеряемых фазовых переменных состояния;
- разработано программное обеспечение (при помощи среды разработки Code Composer Studio), позволяющее определять оценку частоты вращения асинхронного двигателя на основе измеряемых токов и напряжений статора двигателя на базе процессора DSP TMS320F2812.

**Реализация результатов работы.**

Математические модели, алгоритмы и программное обеспечение, разработанные при выполнении диссертационной работы, использовались

при выполнении гранта РФФИ № 09-01-99014-р\_офи «Разработка подходов к повышению эффективности методов и алгоритмов распознавания образов и оценки их качества» и были встроены в программный комплекс «IReDSS», расположенный по адресу: <http://redss.tom.ru>. Разработанная модель оценки частоты вращения асинхронного двигателя интегрирована в программное обеспечение преобразователя частоты ESD TCL, выпускаемого ЗАО «ЭлеСи» (г. Томск). Результаты исследований используются также в учебном процессе подготовки студентов энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета в курсах «Математическое моделирование в электротехнике» и «Комплексная автоматизация технологических процессов».

#### **Основные защищаемые положения:**

- модель оценки неизмеряемой переменной состояния электромеханического объекта с оптимальным алгоритмом перенастройки ее параметров, позволяющая вычислить с приемлемой точностью неизмеряемую переменную состояния не только в установившихся режимах работы объекта, но и во время переходных процессов;
- модель прогноза переменных состояния нелинейного электромеханического объекта на основе ядерных оценок регрессии, позволяющая вычислить оптимальную оценку значений переменных состояния при отсутствии априорной информации о распределении шумов в измерениях;
- алгоритмы оптимизации параметров моделей оценки и прогноза переменных состояния, позволяющие реализовать процедуры оценивания и прогнозирования на вычислительных устройствах в реальном времени;
- программное обеспечение для процессора DSP TMS320F2812, позволяющее оценивать частоту вращения асинхронного двигателя на основе измеряемых токов и напряжений в режиме реального времени.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались на VIII симпозиуме по прикладной и промышленной математике (Сочи – Адлер, 2007 г.); Российской конференции с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» (Москва, 2008 г.); Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2008 – 2009 гг.); Международной научно-технической конференции «Кибернетика и высокие технологии XXI века» (Воронеж, 2009 г.); научно-технических семинарах кафедры электропривода и электрооборудования ЭЛТИ ТПУ (Томск, 2008 – 2010 гг.).

**Публикации.** Результаты выполненных исследований отражены в 13 печатных работах, которые включают в себя 2 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК РФ, 3 статьи в сборниках научных трудов, тезисы 4-х докладов на международных и всероссийских конференциях, 1 патент на изобретение и 3 авторских свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 157 страниц, в том числе рисунков – 66, таблиц – 15, список литературы из 71 наименования, приложение на 26 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, обозначены основные пункты научной новизны и практической значимости результатов исследований, представлена структура диссертации.

**В первой главе** формулируются задачи построения моделей оценки и прогноза в режиме реального времени неизмеряемой компоненты вектора

$X(t) = \begin{pmatrix} Y(t) \\ Z(t) \end{pmatrix}$  состояния электромеханического объекта, где  $Y(t)$  - измеряемые

переменные состояния, включающие шумы;  $Z(t)$  - неизмеряемая переменная состояния. Приводится краткий обзор методов оценивания неизмеряемых переменных в нелинейных объектах. В частности, описывается структура фильтра Калмана и адаптивного наблюдателя с эталонной моделью. Рассматриваются достоинства и недостатки данных типов наблюдателей, на основании чего делается вывод о том, что для динамического объекта, имеющего нелинейную структуру, наиболее предпочтительной является метод, основанный на адаптивных алгоритмах с эталонной моделью. Это связано с тем, что они позволяют построить достаточно адекватные оценки, не только на установившихся режимах работы объекта, но и во время переходных процессов. Для использования подобных наблюдателей в системах управления и обработки информации необходим эффективный алгоритм перенастройки параметров адаптивной модели. Приводится описание некоторых методов прогнозирования переменных состояния объекта, таких как методы, основанные на сглаживании, моделях Бокса-Дженкинса, нейронных сетях, регрессионных моделях. Выделяются основные проблемы, связанные с прогнозированием поведения реальных динамических объектов. Для прогнозирования значений переменных состояния нелинейного электромеханического объекта, представленных временным рядом со случайными компонентами, предлагается использовать регрессионные модели.

**Во второй главе** рассматривается построение модели оценки неизмеряемой переменной состояния электромеханического объекта. Для получения модели оценки предлагается использовать характеристику рассматриваемого объекта, которую можно либо измерить, либо вычислить на основе измерений и, которая принимается в качестве эталонной модели. На основании физических законов, определяется адаптивная модель, в состав которой входит неизмеряемая переменная. Модель оценки неизмеряемой переменной строится на основании преобразования невязки эталонной и адаптивной моделей. Особенностью предложенной модели является наличие процедуры оптимальной

перенастройки ее коэффициентов, позволяющей в реальном времени корректировать значения оценки неизмеряемой переменной в соответствии с режимом работы объекта (рис. 1).

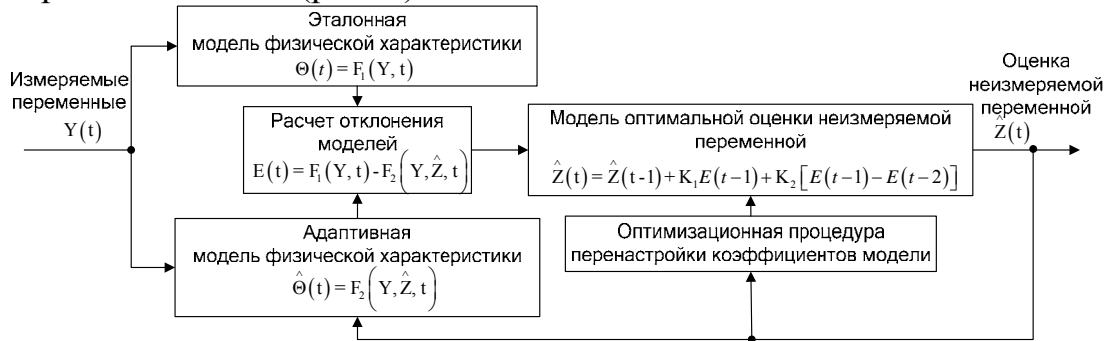


Рисунок 1 – Структура модели оценки неизмеряемой переменной состояния электромеханического объекта

В качестве конкретного объекта исследования рассматривается асинхронный электродвигатель, неизмеряемой переменной состояния которого является частота вращения ротора. Модель оптимальной оценки частоты вращения (рис. 2) основана на сравнении значений реактивной мощности двигателя, вычисляемой по двум моделям. Одна из них выполняет функцию эталонной модели и использует текущие значения измеряемых

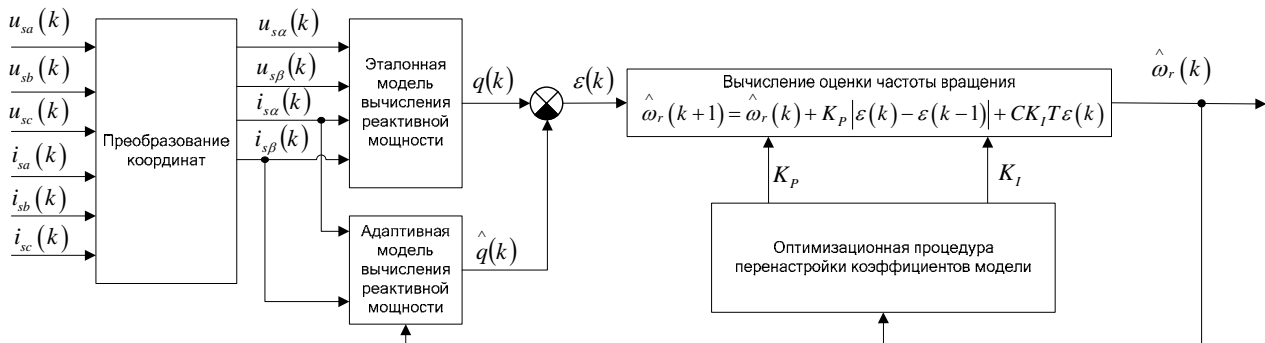


Рисунок 2 – Модель оптимальной оценки частоты вращения асинхронного электродвигателя

фазных токов  $i_{sa}(t), i_{sb}(t), i_{sc}(t)$  и напряжений  $u_{sa}(t), u_{sb}(t), u_{sc}(t)$  статора, преобразованных в соответствующие компоненты пространственного вектора в неподвижной системе координат  $\{\alpha, \beta\}$  для непосредственного определения реактивной мощности  $q(t)$ . Вторая модель представляет собой адаптивную модель, которая вычисляет оценку реактивной мощности двигателя  $\hat{q}(t)$  по косвенным данным – с использованием оцениваемых значений частоты вращения  $\hat{\omega}_r(t)$ .

Реактивная мощность  $q(t)$  вычисляется, как

$$q(t) = i_{s\alpha}(t)u_{s\beta}(t) - i_{s\beta}(t)u_{s\alpha}(t) - \sigma L_s \left( i_{s\alpha}(t) \frac{di_{s\beta}(t)}{dt} - i_{s\beta}(t) \frac{di_{s\alpha}(t)}{dt} \right), \quad (1)$$



где  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$  – коэффициент рассеивания двигателя;  $L_m$  – взаимная индуктивность ротора и статора;  $L_r$  – индуктивность ротора;  $L_s$  – индуктивность статора. Оценка реактивной мощности  $\hat{q}(t)$  вычисляется на основе выражения:

$$\hat{q}(t) = i_{s\alpha}(t) \hat{e}_{s\beta}(t) - i_{s\beta}(t) \hat{e}_{s\alpha}(t), \quad (2)$$

где оценки противо-ЭДС статора  $\hat{e}_{s\alpha}(t)$  и  $\hat{e}_{s\beta}(t)$  в неподвижной системе координат  $\{\alpha, \beta\}$  записываются следующим образом:

$$\begin{cases} \hat{e}_{s\alpha}(t) = \frac{L_m^2}{L_r \tau_r} \left( -\tau_r \hat{\omega}_r(t) i_{m\beta}(t) - i_{m\alpha}(t) + i_{s\alpha}(t) \right), \\ \hat{e}_{s\beta}(t) = \frac{L_m^2}{L_r \tau_r} \left( \tau_r \hat{\omega}_r(t) i_{m\alpha}(t) - i_{m\beta}(t) + i_{s\beta}(t) \right), \end{cases} \quad (3)$$

где символ  $\hat{\phantom{x}}$  означает оценку соответствующих переменных;  $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$  – постоянная времени ротора;  $R_r$  – активное сопротивление ротора;  $i_{m\alpha}(t)$  и  $i_{m\beta}(t)$  – токи намагничивания по осям  $\alpha$  и  $\beta$  в неподвижной системе координат соответственно. Значения токов намагничивания  $i_{m\alpha}(t)$  и  $i_{m\beta}(t)$  определяются в результате решения следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{di_{m\alpha}(t)}{dt} = -\hat{\omega}_r(t) i_{m\beta}(t) - \frac{1}{\tau_r} i_{m\alpha}(t) + \frac{1}{\tau_r} i_{s\alpha}(t), \\ \frac{di_{m\beta}(t)}{dt} = \hat{\omega}_r(t) i_{m\alpha}(t) - \frac{1}{\tau_r} i_{m\beta}(t) + \frac{1}{\tau_r} i_{s\beta}(t). \end{cases} \quad (4)$$

Для реализации предложенной структуры оценивания на вычислительных устройствах все выражения приводятся к дискретной форме в моменты времени  $(kT)$ , где  $k = 1, 2, \dots$ ;  $T$  – период дискретизации вычислений. Используя разностную аппроксимацию уравнения (1) для  $(k)$ -го вычислительного шага, получим следующее уравнение:

$$q(k) = i_{s\alpha}(k) u_{s\beta}(k) - i_{s\beta}(k) u_{s\alpha}(k) - \sigma L_s \left( i_{s\alpha}(k) \frac{i_{s\beta}(k) - i_{s\beta}(k-1)}{T} - i_{s\beta}(k) \frac{i_{s\alpha}(k) - i_{s\alpha}(k-1)}{T} \right). \quad (5)$$

Для первого (начального) вычислительного шага значение реактивной мощности  $q(k=1)$  определяется уравнением

$$q(1) = i_{s\alpha}(1) u_{s\beta}(1) - i_{s\beta}(1) u_{s\alpha}(1). \quad (6)$$

После преобразования уравнения (5) получим итоговый алгоритм прямого расчета реактивной мощности  $q(k)$  в форме дискретных уравнений

$$\begin{cases} q(k) = i_{s\alpha}(k) u_{s\beta}(k) - i_{s\beta}(k) u_{s\alpha}(k) - \frac{\sigma L_s}{T} (i_{s\beta}(k) i_{s\alpha}(k-1) - i_{s\alpha}(k) i_{s\beta}(k-1)), \\ q(1) = i_{s\alpha}(1) u_{s\beta}(1) - i_{s\beta}(1) u_{s\alpha}(1). \end{cases} \quad (7)$$

Используя уравнение (2), запишем дискретное выражение для оценки реактивной мощности:

$$\hat{q}(k) = i_{s\alpha}(k) \hat{e}_{s\beta}(k) - i_{s\beta}(k) \hat{e}_{s\alpha}(k), \quad (8)$$

где оценки против-эдс  $\hat{e}_{s\alpha}(k)$ ,  $\hat{e}_{s\beta}(k)$  статора двигателя по осям  $\alpha$  и  $\beta$  вычисляется следующим образом:

$$\begin{cases} \hat{e}_{s\alpha}(k) = \frac{L_m^2}{L_r \tau_r} \left( -\tau_r \hat{\omega}_r(k) \cdot i_{m\beta}(k) - i_{m\alpha}(k) + i_{s\alpha}(k) \right), \\ \hat{e}_{s\beta}(k) = \frac{L_m^2}{L_r \tau_r} \left( \tau_r \hat{\omega}_r(k) \cdot i_{m\alpha}(k) - i_{m\beta}(k) + i_{s\beta}(k) \right). \end{cases} \quad (9)$$

Для цифрового вычисления значений токов  $i_{m\alpha}(k)$  и  $i_{m\beta}(k)$  можно воспользоваться различными численными методами решения системы дифференциальных уравнений (4). Наиболее простым является метод трапеций, однако, в результате исследований, было установлено, что при использовании этого метода, в некоторых режимах работы двигателя вычислительный процесс расходится. По этой причине, для решения системы (4), был использован более точный метод – метод Рунге – Кутта четвертого порядка, который позволяет получить хорошую сходимость вычислительной процедуры.

Модель оптимальной оценки неизмеряемой переменной строится на основе пропорционально-интегрального закона преобразования отклонения  $\varepsilon(k) = q(k) - \hat{q}(k)$  в оценку  $\hat{\omega}_r(k)$  частоты вращения двигателя, который в дискретной форме имеет вид

$$\hat{\omega}_r(k+1) = \hat{\omega}_r(k) + K_p |\varepsilon(k) - \varepsilon(k-1)| + CK_I T \varepsilon(k), \quad (10)$$

где  $K_p$ ,  $K_I$  – коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих закона преобразования соответственно;  $C$  – нормирующий коэффициент, позволяющий использовать в качестве оптимальных коэффициентов  $K_p$  и  $K_I$  значения одного порядка;  $T$  – период дискретизации. Выбор коэффициентов пропорционально-интегрального закона в момент времени  $k$  осуществляется исходя из оптимизационного критерия, который заключается в минимизации среднего отклонения моделей (7) и (8) реактивной мощности

$$(K_p, K_I) = \arg \min_{K_p, K_I} (|\varepsilon(k-2, K_p, K_I)| + |\varepsilon(k-1, K_p, K_I)| + |\varepsilon(k, K_p, K_I)|), \quad (11)$$

где  $k$  – целое вещественное число, характеризующее номер итерации вычислений. При построении минимизируемой функции используются переменные, полученные в результате численного решения системы (4), вследствие чего явный вид этой функции заранее неизвестен. Этот факт затрудняет использование алгоритмов оптимизации, основанных на вычислении производных, т.к. в данном случае это потребует больших вычислительных затрат. По этой причине, для поиска оптимальных коэффициентов  $K_p$  и  $K_I$  целесообразно использовать алгоритмы оптимизации, которые не требуют вычисления производных. Такие алгоритмы называются алгоритмами прямого поиска, одним из которых является алгоритм деформированного многогранника Нелдера-Мида. Он позволяет при

сравнительно небольшом объеме вычислений получить значения коэффициентов  $K_p$  и  $K_I$ , обеспечивающих допустимую точность оценивания.

Для моделирования оценки был разработан программный модуль на языке программирования C++, обеспечивающий выполнение следующих функций:

1) считывание данных о значениях токов и напряжений в системе координат  $\{\alpha, \beta\}$ ;

2) вычисление реактивной мощности асинхронного двигателя по двум алгоритмам: с использованием измеряемых значений токов и напряжений и на основе оценки частоты вращения двигателя;

3) перенастройку значений оценки частоты вращения двигателя по оптимальному алгоритму, использующему квадратичный критерий качества.

Для построения оценки в программу загружаются параметры схемы замещения двигателя:  $R_r, L_s, L_r, L_m$ , массивы данных о токах и напряжениях, и период дискретизации входных данных. Результатом работы программы является массив оценок частоты вращения.

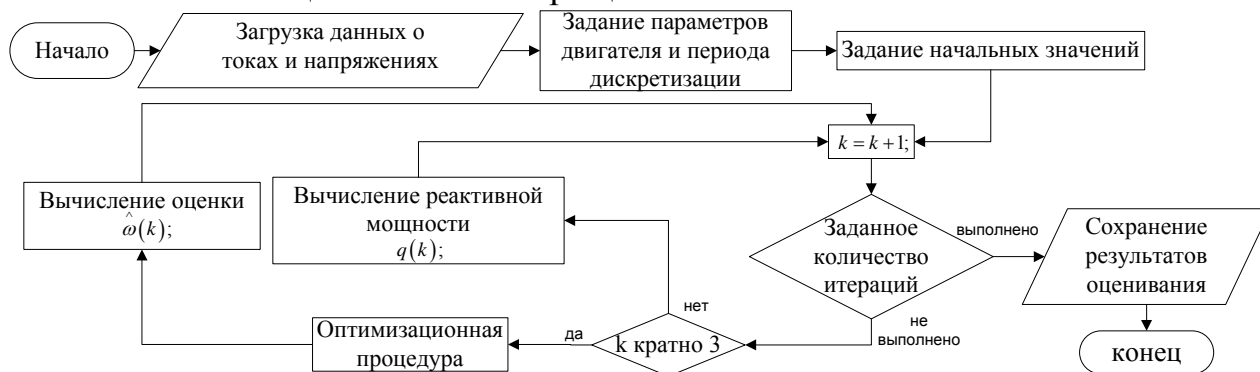


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма построения оценки частоты вращения электродвигателя

Для проверки работоспособности предложенной модели оценки было проведено математическое моделирование. В качестве среды моделирования асинхронного двигателя АИМ А100L4 использовалось приложение Simulink пакета Matlab. Решение системы дифференциальных уравнений, описывающих состояние двигателя, выполнялось методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Значения измеряемых переменных состояния электродвигателя измерялись с интервалом в одну миллисекунду. Модель оценки была протестирована на входных данных с аддитивными шумами. В качестве аддитивного шума была использована гауссовская случайная величина с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, подобранной таким образом, чтобы максимальное значение шума не превосходило 10% от действующего значения входного сигнала.

Модель оценки была протестирована при различных режимах работы электродвигателя. Графики полученных переходных процессов изображены на рис. 4.

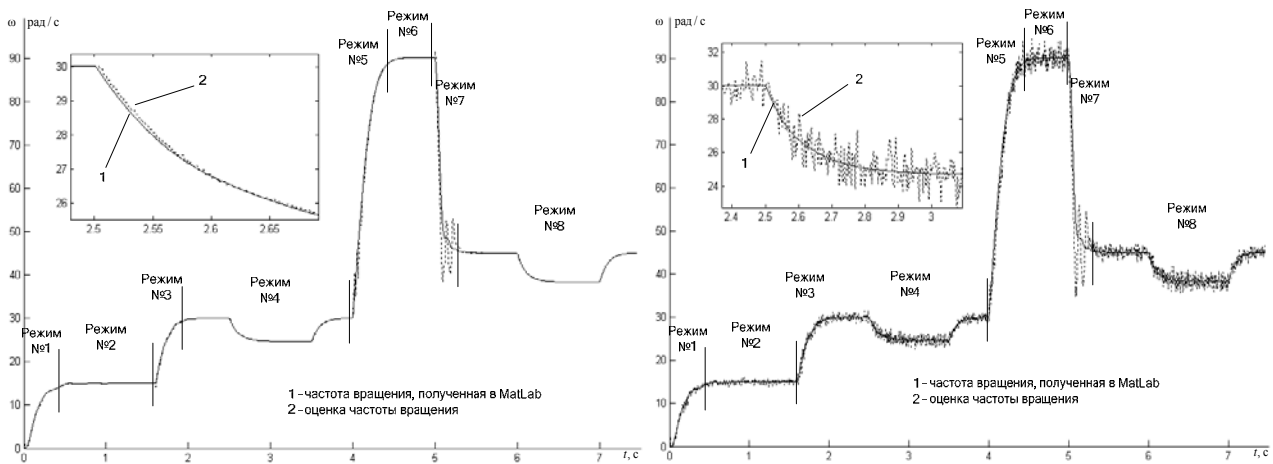


Рисунок 4 – Оценка частоты вращения: слева - по измерениям без шумов, справа - по измерениям с аддитивными шумами

Для определения качества оценок использовались значения средних ошибок на интервале оценивания, вычисляемых по формуле

$$\eta_{\omega} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{|\hat{\omega}(t_j) - \omega(t_j)|}{|\omega(t_j)|} \cdot 100\%, \quad (12)$$

где  $N$  - длина интервала;  $\hat{\omega}(t_j)$  – оценка частоты вращения в момент времени  $t_j$ ;  $\omega(t_j)$  – реальное значение частоты вращения ротора в момент времени  $t_j$ .

Для сравнения качества оценивания предложенной модели было проведено оценивание частоты вращения двигателя на основе фильтра Калмана. Значения полученных ошибок оценивания представлены в таблицах 1 - 2.

Таблица 1 – Оценивание без шумов в измерениях

№ режима	Переходные режимы				Установившиеся режимы			
	2	4	6	8	1	3	5	7
Средняя ошибка оптимального оценивания, %	0.05	0.08	0.04	0.06	2.7	1.2	1.5	8.8
Средняя ошибка оценивания фильтром Калмана, %	3.6	3.4	2.1	28.9	24	15.2	17.1	38.6

Таблица 2 – Оценивание при зашумленных исходных данных

№ режима	Переходные режимы				Установившиеся режимы			
	2	4	6	8	1	3	5	7
Средняя ошибка оптимального оценивания, %	1.7	2	1.4	1.9	5.6	3.3	3.4	11.1
Средняя ошибка оценивания фильтром Калмана, %	5.4	3.5	2.4	31.1	25.9	17.1	17.6	44.3

В результате исследований было установлено, что ошибка оценивания предложенной модели на установившихся режимах не превосходит 2%, а во время переходных процессов не превосходит 11%. В то время как ошибка оценивания на основе фильтра Калмана во время переходных процессов достигает 44%. Также установлено, что в случае изменения нагрузки качество оценивания предлагаемой модели не изменяется.

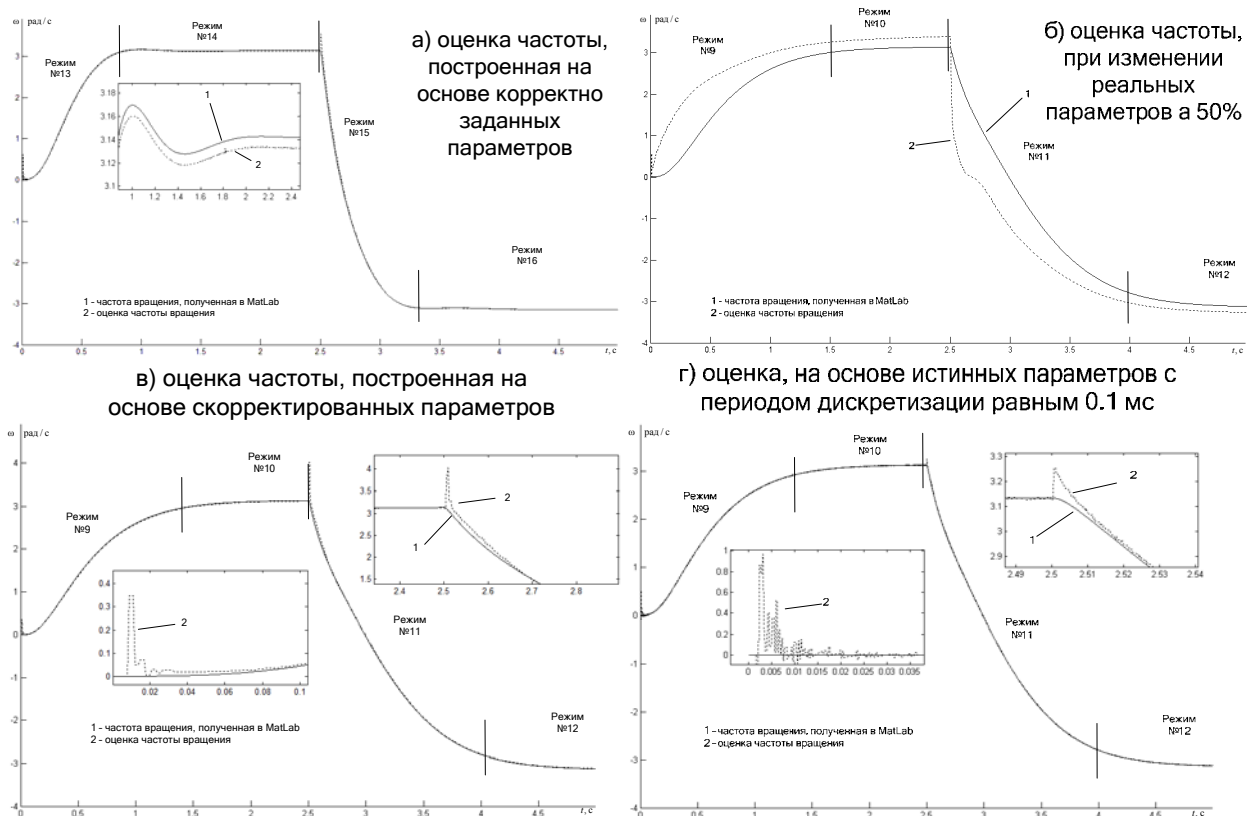


Рисунок 5 – Режим пуска и реверса электродвигателя на частоте вращения 1 Гц

В результате проверки модели оценки частоты вращения на малых значениях было установлено, что ошибка в момент пуска двигателя равна 1.3%, при реверсе – 3.8%, на установившемся режиме – 0.3%. В модель оценки входят параметры двигателя, которые в процессе его работы могут изменяться, поэтому для корректного оценивания частоты, необходимо проводить предварительную идентификацию этих параметров. Было установлено, что при увеличении сопротивлений статора и ротора на 50%, оценка, основанная на неизменных параметрах, остается сходящейся к определенному значению, но при этом увеличивается ошибка оценивания. Было также установлено, что отклонение оценки от реального значения связано с погрешностью расчета модели двигателя и с ошибками вычислений. Уменьшение периода дискретизации с 1 мс до 0.1 мс, позволяет уменьшить погрешность вычислений для разных режимов работы двигателя от 2 до 5 раз (рис. 5 г).

Таблица 3 – Средние ошибки оценивания неизмеряемой переменной состояния

№ режима	9	10	11	12
Ошибка оценивания на основе некорректных параметров, %	80	7.7	62	5.6
Ошибка оценивания на основе истинных параметров, %	2.2	0.4	5.6	0.3
Ошибка оценивания на основе истинных параметров с периодом дискретизации равным 0.1 мс, %	1.1	0.08	0.8	0.07

В третьей главе предлагается модель прогноза неизмеряемых переменных состояния объекта, представленных временным рядом со случайными компонентами. В случае, когда закон распределения вероятностей случайной составляющей неизвестен, для прогнозирования предлагается

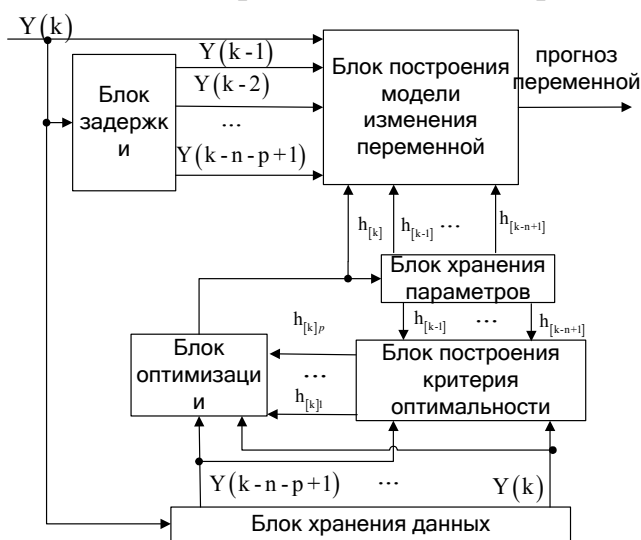
использовать непараметрические регрессионные модели. В качестве модели изменения переменной используется функция регрессии, являющаяся моделью, минимизирующей среднеквадратическую ошибку. Модель прогноза переменной на интервале  $[t(T), t(T+1)]$  строится на основании модели изменения временного ряда, построенной на базе ядерных оценок регрессии

$$\hat{Y}(t(T+1)) = Y(t(T)) + \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta Y_{i+p}}{\prod_{z=1}^p h_{[i]z}^o} K\left(\frac{\Delta Y_{n+1} - \Delta Y_i}{h_{[i]1}^o}, \dots, \frac{\Delta Y_{n+p} - \Delta Y_{i+p-1}}{h_{[i]p}^o}\right)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\prod_{z=1}^p h_{[i]z}^o} K\left(\frac{\Delta Y_{n+1} - \Delta Y_i}{h_{[i]1}^o}, \dots, \frac{\Delta Y_{n+p} - \Delta Y_{i+p-1}}{h_{[i]p}^o}\right)}, \quad (13)$$

где  $\Delta Y_i = Y(i) - Y(i-1)$ ,  $K(u) = K(u_1, \dots, u_p)$  -  $p$ -мерная ядерная функция,  $h_{[n]k} > 0$  - последовательность чисел, называемых параметрами размытости, сходящаяся к нулю для каждого  $k = \overline{1, p}$ . При использовании оценок данного типа, основной задачей является выбор ядерной функции и параметров размытости. В качестве ядерной функции может быть выбрана функция, обладающая свойствами плотности распределения случайных величин такими, как  $\int_{R^p} K(u) du = 1$ ,  $K(u) \geq 0$ ,

$K(u) = K(-u)$ . В качестве многомерного ядра часто используют произведение плотностей распределения нормальных случайных величин с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией. Это объясняется тем, что данные ядра, как правило, позволяют строить адекватные оценки, удовлетворяющие заданным требованиям, а также упрощают исследование свойств ядерных оценок.

Для построения модели переменной предлагается структура,



позволяющая оптимизировать расчет параметров размытости в каждый момент времени (рис. 6). В блоке оптимизации реализована процедура оптимизации функционала качества, сформированного в блоке построения критерия качества. В блоке построения модели переменной осуществляется вычисление оценки регрессии с использованием оптимальных параметров этой оценки.

Рисунок 6 – Структура модели прогноза переменной состояния объекта

Для выбора параметров размытости можно воспользоваться критерием полного скользящего контроля, который заключается в том, что по выборке из  $N$  элементов строится  $N$  разбиений на две подвыборки – обучающую и контрольную. Для каждого разбиения строится модель по обучающей

подвыборке, затем оценивается его средняя ошибка на контрольной подвыборке. Оптимальными значениями параметров размытости считаются параметры, минимизирующие среднюю ошибку по всем разбиениям.

$$h_{[n]}^o = \operatorname{argmin}_{\substack{h_{[n]} > 0, \\ i=1, p}} \sum_{i=1}^{n-1} \Delta Y_{i+p} \left| \frac{\sum_{j \neq i}^{n-1} \frac{\Delta Y_{j+p}}{\prod_{z=1}^p h_{[j]z}} K \left( \frac{\Delta Y_i - \Delta Y_j}{h_{[j]1}}, \dots, \frac{\Delta Y_{i+p-1} - \Delta Y_{j+p-1}}{h_{[j]p}} \right) + \frac{\Delta Y_{n+p}}{\prod_{z=1}^p h_{[n]z}} K \left( \frac{\Delta Y_i - \Delta Y_n}{h_{[n]1}}, \dots, \frac{\Delta Y_{i+p-1} - \Delta Y_{n+p-1}}{h_{[n]p}} \right)}{\sum_{j \neq i}^{n-1} \frac{1}{\prod_{z=1}^p h_{[j]z}} K \left( \frac{\Delta Y_i - \Delta Y_j}{h_{[j]1}}, \dots, \frac{\Delta Y_{i+p-1} - \Delta Y_{j+p-1}}{h_{[j]p}} \right) + \frac{1}{\prod_{z=1}^p h_{[n]z}} K \left( \frac{\Delta Y_i - \Delta Y_n}{h_{[n]1}}, \dots, \frac{\Delta Y_{i+p-1} - \Delta Y_{n+p-1}}{h_{[n]p}} \right)} \right|. \quad (14)$$

Другим способом выбора параметров  $h_{[n]}^o$ , является использование критерия максимального правдоподобия, который заключается в максимизации функции правдоподобия

$$h_{[n]}^o = \operatorname{argmax}_{h_{[n]} > 0, i=1, p} \prod_{i=1}^n \frac{1}{n} \left\{ \sum_{j \neq i}^{n-1} \frac{1}{\prod_{z=1}^p h_{[j]z}} K \left( \frac{\Delta Y_i - \Delta Y_j}{h_{[j]1}}, \dots, \frac{\Delta Y_{i+p-1} - \Delta Y_{j+p-1}}{h_{[j]p}} \right) + \frac{1}{\prod_{z=1}^p h_{[n]z}} K \left( \frac{\Delta Y_i - \Delta Y_n}{h_{[n]1}}, \dots, \frac{\Delta Y_{i+p-1} - \Delta Y_{n+p-1}}{h_{[n]p}} \right) \right\}. \quad (15)$$

При нахождении оптимальных параметров из критериев (14) и (15) необходимо проводить многомерную оптимизацию. В случае, когда рассматривается авторегрессионная зависимость между измерениями, имеет место равенство

$$h_{[i]j} = h_{[i+j]}. \quad (16)$$

Для оценок регрессии Надарая-Ватсона в классическом варианте применяются параметры вида

$$h_{[i]j} = hn_{[j]}, \quad (17)$$

$$h_{[i]j} = hn. \quad (18)$$

Для ускорения процедуры получения оптимальных параметров размытости предлагается использовать следующую рекуррентную процедуру расчета критериев (14) и (15). Вводятся обозначения:  $\Delta Y_i(T) = \Delta Y(t(T - N - p + i))$ ,  $i = \overline{1, N + p}$ ,  $h(T)$  - набор параметров размытости, соответствующий моменту времени  $t(T)$ ,

$$\delta_{i,j}(\Delta Y, h, T) = \frac{1}{\prod_{z=1}^p h_{[j+z]}(T)} K \left( \frac{\Delta Y_i(T) - \Delta Y_j(T)}{h_{[j]1}(T)}, \dots, \frac{\Delta Y_{i+p-1}(T) - \Delta Y_{j+p-1}(T)}{h_{[j]p}(T)} \right), \quad (19)$$

$$A_{[n]}(i, T) = \sum_{j \neq i}^{n-1} \frac{\Delta Y_{j+p}(T)}{\prod_{z=1}^p h_{[j+z]}(T)} K \left( \frac{\Delta Y_i(T) - \Delta Y_j(T)}{h_{[j]1}(T)}, \dots, \frac{\Delta Y_{i+p-1}(T) - \Delta Y_{j+p-1}(T)}{h_{[j]p}(T)} \right), \quad (20)$$

$$F_{[n]}(i, T) = \sum_{j \neq i}^{n-1} \frac{1}{\prod_{z=1}^p h_{[j+z]}(T)} K \left( \frac{\Delta Y_i(T) - \Delta Y_j(T)}{h_{[j]1}(T)}, \dots, \frac{\Delta Y_{i+p-1}(T) - \Delta Y_{j+p-1}(T)}{h_{[j]p}(T)} \right). \quad (21)$$

Используя принятые обозначения, функцию критерия (14) можно записать в виде

$$h_{[n]}^{\circ} = \operatorname{argmin}_{h_{[n]} > 0, i=1, \overline{p}} \sum_{i=1}^{n-1} \left| \Delta Y_{i+p}(T) - \frac{A_{[n]}(i, T) + \delta_{i,n}(\Delta Y(T), h, T) \Delta Y_{n+p}(T)}{F_{[n]}(i, T) + \delta_{i,n}(\Delta Y(T), h, T)} \right|, \quad (22)$$

а для критерия (15) в виде

$$h_{[n]}^{\circ} = \operatorname{argmax}_{h_{[n]} > 0, i=1, \overline{p}} \prod_{i=1}^n [F_{[n]}(i, T) + \delta_{i,n}(\Delta Y(T), h, T)]. \quad (23)$$

Для функций  $A_{[n]}(i)$  и  $F_{[n]}(i)$  справедливы следующие рекуррентные соотношения:

$$\begin{cases} A_{[j]}(i, T) = A_{[j-1]}(i, T) + \delta_{i,j-1}(\Delta Y, h, T) \Delta Y_{j-1}(T); \\ F_{[j]}(i, T) = F_{[j-1]}(i, T) + \delta_{i,j-1}(\Delta Y, h, T); & i = \overline{1, n-2}, j = \overline{3, n}, n \geq 3; \\ A_{[2]}(1, T) = 0; F_{[2]}(1, T) = 0; \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} A_{[n]}(i, T) = A_{[n]}(i+1, T-1) + \delta_{i,n-1}(\Delta Y, h, T) \Delta Y_{n-1} - \delta_{i+1,1}(\Delta Y, h, T-1) \Delta Y_1(T-1); \\ F_{[n]}(i, T) = F_{[n]}(i+1, T-1) + \delta_{i,n-1}(\Delta Y, h, T) - \delta_{i+1,1}(\Delta Y, h, T-1); \end{cases}, i = \overline{1, n-2}; \quad (25)$$

$$\begin{cases} A_{[n]}(n-1, T) = \sum_{j=1}^{n-2} \delta_{n-1,j}(\Delta Y, h, T) \Delta Y_{j+p}(T); \\ F_{[n]}(n-1, T) = \sum_{j=1}^{n-2} \delta_{n-1,j}(\Delta Y, h, T). \end{cases} \quad (26)$$

Применение данной рекуррентной процедуры позволяет увеличить скорость расчета параметров размытости примерно в  $N$  раз.

Прогнозирование проводилось с помощью программного модуля, разработанного на языке программирования C++, обеспечивающего выполнение следующих функций:

- 1) считывание данных о переменной состояния объекта, представленной в виде временного ряда;
- 2) построение модели изменения переменной на основе полурекуррентной ядерной оценки регрессии;
- 3) построение критериальных функций выбора оптимальных параметров модели;
- 4) перенастройку параметров модели прогноза.

Для построения прогноза в программу загружаются следующие данные:  $p$  - порядок авторегрессии,  $N$  - величина временного окна, определяющего объем выборки, необходимый для построения модели, массив данных о прогнозируемой переменной. Результатом работы программы является массив прогнозов исследуемой переменной.

Прогнозирование переменных состояния объекта предлагается проводить по алгоритму (рис. 7), согласно которому на контрольной выборке определяется оптимизационный критерий выбора параметров размытости для модели изменения переменной  $\Delta Y(t)$ , обеспечивающий минимальную среднеквадратическую ошибку. Дальнейшее прогнозирование проводится с использованием выбранного критерия. В блоках построения функций 1-8

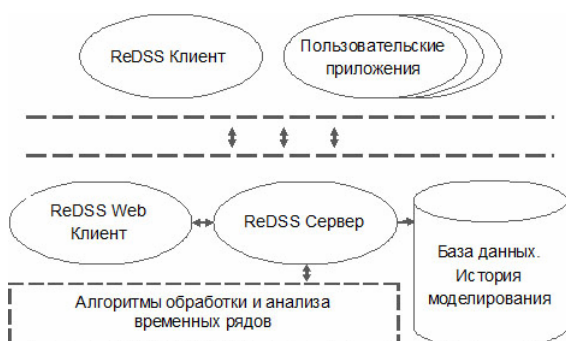


реализовано вычисление функций критериев (14) и (15), при ограничениях (16), (17), (18).



Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма прогнозирования переменных состояния

Алгоритм, описанный выше, интегрирован в программный комплекс «IReDSS» - интеллектуальная модель распознавания состояний динамических систем». Данный комплекс предназначен для исследования динамических систем или их моделей, переменные состояния которых представлены временными рядами. Комплекс включает в себя набор различных алгоритмов, этот набор может быть дополнен пользователем. Важной особенностью комплекса является возможность создания модели, состоящей из блоков - алгоритмов комплекса, модель хранит как структуру, так и настройки отдельных алгоритмов. Программный комплекс имеет распределенную архитектуру. На стороне сервера развертывается база данных (в которой хранится история моделирования), набор алгоритмов, включенных в состав комплекса (выполненные в виде подключаемых модулей). Для настройки



сервера, а также для демонстрации его работы и просмотра списка подключенных модулей в состав комплекса входит WEB-клиент. С клиентской стороны работа с комплексом осуществляется при помощи ReDSS-клиента (который входит в состав комплекса).

Рисунок 8 – Структура программного комплекса «IReDSS»

Для проверки работоспособности модели прогноза было проведено моделирование. В качестве исходных данных использовались данные об оценке частоты вращения асинхронного двигателя АИМ А100L4, построенной на основе данных модели, составленной в среде MatLab. Для сравнения

эффективности предложенной модели с известными решениями, было проведено прогнозирование с использованием линейной авторегрессионной модели первого порядка. Коэффициенты авторегрессии рассчитывались по методу наименьших квадратов. В качестве показателя качества использовалась средняя ошибка прогнозирования:

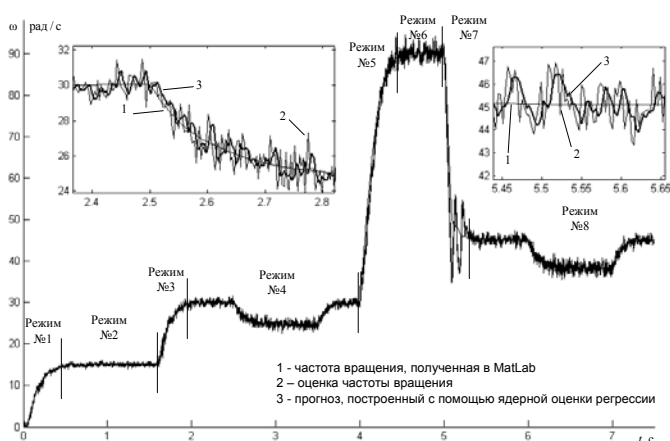
$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{|\hat{Y}(t_j) - Y(t_j)|}{|Y(t_j)|} \cdot 100\%, \quad (27)$$

где  $\hat{Y}(t_j)$  - прогноз переменной в момент времени  $t_j$ ,  $Y(t_j)$  - реальное значение прогнозируемой переменной в момент времени  $t_j$ . При определении критерия оптимизации в качестве контрольной выборки использовались первые 100 значений исследуемой переменной. Для корректной работы процедуры оптимизации входные данные предварительно нормировались таким образом, чтобы существовали точки, в которых ядерная функция отлична от нуля. Результат оценивания изображен на рисунке 9.

Значения средних ошибок прогнозирования представлены в таблице 4. Моделирование показало, что ошибки прогнозирования в установившихся режимах не превосходят 1.3%, а во время переходных процессов не превосходит 10%, что соответствует уровню ошибок оценивания. В сравнении с моделью линейной авторегрессии, непараметрическая модель дает лучшие результаты.

Таблица 4 – Средние ошибки прогнозирования частоты вращения

№ режима	Установившиеся режимы				Переходные режимы			
	2	4	6	8	1	3	5	7
Непараметрическая модель, %	1.1	1.3	1	1.3	5.7	2.8	3.4	9.8
Линейная авторегрессия, %	1.9	1.7	1.2	1.6	6.9	3	3.9	10



Моделирование показало, что время одной итерации не превышает 0.5 мс, в то время как интервал между измерениями равен 1 мс. Следовательно, алгоритм прогнозирования позволяет устранить задержку, возникающую при оценивании неизмеряемой переменной состояния объекта.

Рисунок 9 – Прогнозирование частоты вращения ротора

В четвертой главе дается описание экспериментального тестирования моделей, предложенных в предыдущих главах. Для проверки работы моделей в реальных условиях были проведены исследования на оборудовании компании «ЭлеСи» (г. Томск). Испытания проводились следующим образом:

- на испытательном стенде производилось оценивание частоты вращения асинхронного двигателя в различных режимах его работы;
- по данным, полученным со стенда о токах, напряжениях и оценке частоты вращения было произведено прогнозирование полученных переменных с помощью программного модуля, разработанного на языке программирования C++.

Испытательный стенд, включающий в себя асинхронный двигатель АИМ А100L4 мощностью 4кВт и датчик скорости вращения вала для определения качества оценки, представлен на рисунке 10. Для управления двигателем использовался преобразователь частоты фирмы «ЭлеСи» ESD-TCL. Данный преобразователь укомплектован сигнальным процессором фирмы «Texas Instruments» серии C2000 TMS320F2812, обладающим вычислительной мощностью 150 млн. операций в секунду. Для данного процессора был реализован программный модуль, выполняющий процедуру построения оценки частоты вращения.

При реализации алгоритма оценивания на DSP TMS320F2812, в целях сокращения времени выполнения математических операций, были применены специальные процедуры среды Code Composer Studio. Для применения этих процедур потребовалось ввести дополнительные нормировочные множители в уравнения модели оценки. В итоге удалось добиться того, чтобы все вычисления производились в одном формате данных. За счет оптимизации программного кода удалось добиться частоты вызова расчетной процедуры равной 1 кГц, с учетом того, что на контроллере кроме процедуры оценки

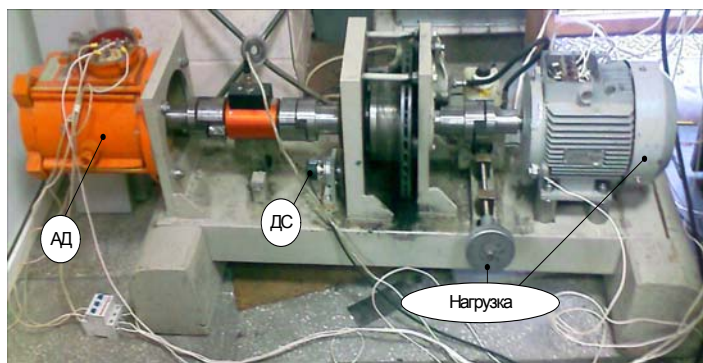


Рисунок 10 – Испытательный стенд

запущены другие расчетные процедуры системы управления двигателем. Испытания на стенде подтвердили работоспособность модели оценки частоты вращения. Было установлено, что на установившемся режиме средняя ошибка не превосходит 1.5% (рис. 11).

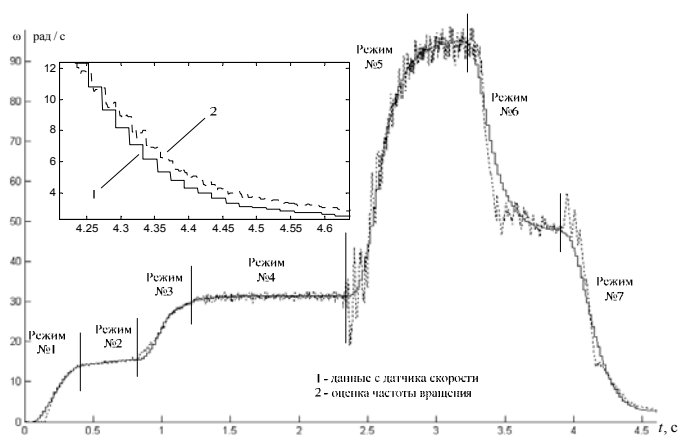
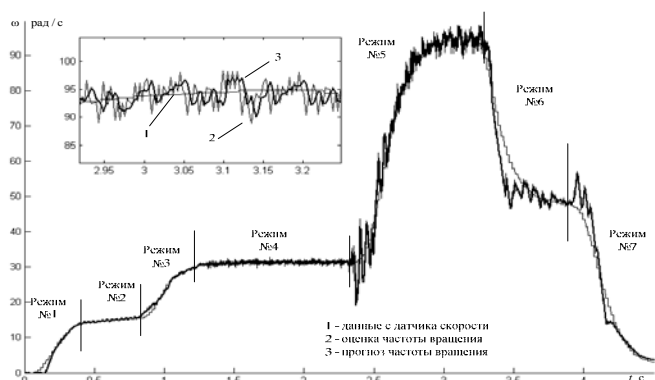


Рисунок 11 – Оценка частоты вращения

Таблица 5 – Результаты оценки частоты вращения

№ режима	1	2	3	4	5	6	7
Средняя ошибка оценивания, %	15	1.3	3.2	1.5	5.4	5.3	14.2



Во время переходных процессов ошибка изменяется от 3% до 15%. Увеличение ошибки оценивания во время переходных процессов связано с установкой времени выхода на заданный режим. Так, во время эксперимента, время разгона и торможения устанавливалось равным 0.5 с., что приводило к резкому изменению тока.

Рисунок 12 – Прогноз частоты вращения электродвигателя

По результатам прогнозирования частоты вращения ротора было установлено, что средняя ошибка прогнозирования находится на уровне ошибки оценивания. Таким образом, предложенная модель прогноза позволила устранить задержку оценивания без увеличения ошибки.

Таблица 6 – Результаты прогнозирования

№ режима	1	2	3	4	5	6	7
Средняя ошибка прогнозирования, %	16	0.95	3.1	1.58	4.03	5.09	13.8

**В заключении** изложены основные результаты исследований, представленных в диссертационной работе.

**В приложении** приведены акты внедрения результатов исследований в промышленность и учебный процесс, копии авторских свидетельств и патента, листинги программ.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана модель оценки неизмеряемой переменной состояния электромеханического объекта с оптимальным алгоритмом перенастройки ее параметров, позволяющая вычислить с приемлемой точностью неизмеряемую переменную состояния не только на установившихся режимах работы объекта, но и во время переходных процессов. Сходимость вычислительной процедуры обеспечивается корректным выбором параметров оптимизационной процедуры Нелдера-Мида и применением метода Рунге-Кутты 4-го порядка для решения системы дифференциальных уравнений.
2. Разработана модель прогноза переменных состояния нелинейного электромеханического объекта на основе ядерных оценок регрессии, позволяющая вычислить оптимальную оценку значений переменных состояния при отсутствии априорной информации о распределении шумов в измерениях. Предложенная модель дает ошибку

- прогнозирования, не превышающую уровень шумов в измерениях.
3. Разработана модель оценки частоты вращения асинхронного двигателя, позволяющая добиться высокого качества оценивания частоты в диапазоне от 1Гц до 50Гц. Ошибка оценивания в установившемся режиме составляет около 2%, а во время переходных процессов не превышает 15%.
  4. Разработано программное обеспечение в среде разработки C++ Builder для моделирования процессов в асинхронном электроприводе, позволяющее оценивать частоту вращения асинхронного двигателя и прогнозировать его переменные состояния на основе предложенных моделей.
  5. Разработанная модель прогноза интегрирована в программный комплекс «IReDSS», предназначенный для исследования динамических объектов или их моделей, переменные состояния которых представлены временными рядами. Данный программный комплекс обеспечивает загрузку значений временного ряда из файла входных данных, выполнение прогнозирования, графическое изображение полученных результатов и сохранение их в файл выходных данных.
  6. Для системы управления асинхронным электроприводом на базе процессора DSP TMS320F2812 разработано программное обеспечение, позволяющее оценивать частоту вращения асинхронного двигателя на основе измеряемых фазных токов и напряжений. Реализованная процедура позволяет получать сведения о скорости вращения вала двигателя с дискретностью не более одной миллисекунды.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Аксенов Д.С., Лаходынов В.С. Алгоритм оценки частоты вращения асинхронного двигателя с учетом параметров питающего кабеля // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2008. – №1(17). – с. 94-99.
2. Кошкин Г.М., Лаходынов В.С. Полурекуррентное непараметрическое прогнозирование в моделях нелинейных авторегрессий // Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2007. –Т. 14. – Вып. 5. – с. 900-901.
3. В.Г. Букреев, В.С. Лаходынов Оптимизация оценки частоты вращения асинхронного двигателя в бездатчиковом электроприводе // “Itech-журнал интеллектуальных технологий”. – 2009. – №13. – с. 42–45.
4. В.С. Лаходынов, В.Г. Букреев Идентификация регрессионных моделей сигналов в задачах фильтрации и прогнозирования состояния стохастической системы // Сб. докладов X Междунар. науч.-техн. конф. с межд. уч. «Кибернетика и высокие технологии XXI века». – Воронеж: НПФ «Саквоее». – 2009. – т. I. – с. 64–74.
5. Д.С. Аксенов, В.С. Лаходынов Реализация алгоритма оценки частоты вращения асинхронного двигателя на базе процессора DSP TMS 320 F

- 2812 // Современные техника и технологии: Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Томск. – 2009. – Т. 1. – с. 361–362.
6. Кошкин Г.М., Лаходьнов В.С. Полурекуррентная непараметрическая идентификация условных функционалов слабозависимых последовательностей // Вестник Томского государственного университета. «Управление, вычислительная техника и информатика». – 2008. – № 1(2). – с. 57–68.
  7. Аксенов Д.С. Алгоритм оценки частоты вращения асинхронного двигателя с учетом параметров питающего кабеля 2812 / Д.С. Аксенов, В.С. Лаходьнов // Современные техника и технологии: Сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Томск. – 2008. – Т. 1. – с. 333–334.
  8. Лаходьнов В.С. Синтез наблюдателя состояний для оценки частоты вращения погружного электродвигателя электроцентробежного насоса / В.С. Лаходьнов, В.Г. Букреев // Материалы Росс. конф. с межд. уч. «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерений». – М. – 2008. – С. 128–130.
  9. Лаходьнов В.С., Букреев В.Г. Синтез наблюдателя состояний для оценки частоты вращения погружного электродвигателя электроцентробежного насоса // Сб. докладов Росс. конф. с межд. уч. «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерений. УКИ'08». – 2008. – №4. – С. 433–438.
  10. Букреев В.Г., Лаходьнов В.С., Аксенов Д.С. Способ оптимальной оценки частоты вращения асинхронного двигателя. Патент на изобретение № 2385529 от 27.03.2010.
  11. Букреев В.Г., Лаходьнов В.С., Аксенов Д.С. Оптимальный наблюдатель частоты вращения асинхронного двигателя. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008614144.
  12. Лаходьнов В.С., Букреев В.Г. Оптимальное прогнозирование дискретных сигналов в стохастической системе. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009614044.
  13. Колесникова С.И., Букреев В.Г., Мертвецов А.Н., Цой Ю.Р., Лаходьнов В.С., Аксенов Д.С. «IReDSS»-Интеллектуальная модель распознавания состояний динамических систем. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010610441.

**Личный вклад автора.** В публикациях [1], [3], [5], [7]-[11] автору принадлежит разработка алгоритма оценки частоты вращения асинхронного двигателя; в [1], [3], [8]-[11] – разработка алгоритма оптимизации параметров модели оценки ненаблюдаемой переменной состояния электромеханического объекта; в [2], [4] – разработка алгоритма оптимизации параметров регрессионной модели прогноза; [6] – исследование асимптотических свойств полурекуррентных ядерных оценок и определение оптимальных параметров размытости; [12], [13] – разработка алгоритма прогнозирования переменных состояния электромеханического объекта; [11]-[13] – разработка программ.