

На правах рукописи

Пискунов Алексей Алексеевич

**СТОХАСТИЧЕСКАЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ  
ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

Специальность: 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2006

Работа выполнена на кафедре «Управляющие и вычислительные системы» Вологодского государственного технического университета

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент  
Водовозов Александр Михайлович

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор  
Швецов Анатолий Николаевич  
кандидат технических наук, доцент  
Кривцов Александр Николаевич,

Ведущая организация – научно-производственное предприятие  
«Новтех», г. Вологда

**Защита состоится** «\_\_» мая 2006 г. в \_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.20 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Главное здание, ауд. 150.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан \_\_ апреля 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 212.229.20, к.т.н., доц.

Курмашев А.Д.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

Современное состояние промышленности характеризуется интенсивным развертыванием новых производств, внедрением новой техники и новых технологий, что делает продукцию конкурентоспособной на мировых рынках. Повышение эффективности использования техники в таких экономических условиях становится основной целью научных исследований и разработок. Мощным фактором, влияющим на требования к показателям точности и надежности работы оборудования, являются условия эксплуатации электроприводов, и, именно поэтому, все большее внимание в настоящее время уделяется вопросам идентификации их параметров непосредственно в условиях промышленной эксплуатации, решение которых необходимо для стабилизации и оперативной корректировки настроек действующего технологического оборудования.

Современные методы теории автоматического управления позволяют организовать исследования динамики практически любой системы автоматизированного электропривода. Однако расчетный путь определения параметров привода по результатам отдельных испытаний с использованием стандартных испытательных сигналов всегда сопряжен со значительными организационными и техническими трудностями, сам является источником больших погрешностей, и практически неприменим на этапе эксплуатации оборудования.

Стохастический метод параметрической идентификации является одним из перспективных методов, позволяющим определять параметры системы без изменения режима работы электропривода. Возможность его применения для исследования систем электропривода рассматривается в работах Н.И. Ратнера, Ю.А. Борцова, В.И. Гайдукевича и др. Однако, большинство публикаций, посвящено вопросам использования теории случайных функций и ее прикладных аспектов, затрагивает главным образом теоретические стороны спектрального анализа и, как правило, не содержит практических рекомендаций по их внедрению в практику эксплуатации и исследования электроприводов.

**Целью диссертационной работы** является разработка методики стохастической параметрической идентификации электропривода, как динамической системы, и исследование эффективности ее применения в условиях промышленной эксплуатации электроприводов.

Для достижения указанной цели в работе ставятся и решаются следующие **задачи**:

- анализ различных подходов к решению задачи идентификации параметров электроприводов;
- разработка методики идентификации динамических характеристик электропривода в процессе его работы стохастическими методами путем

оценки комплексного коэффициента передачи по результатам совместного наблюдения входного и выходного сигнала;

- разработка аппарата математического моделирования, алгоритмов его использования и комплекса программных средств, позволяющих решить задачу параметрической идентификации электропривода в условиях эксплуатации;

- теоретический и практический анализ эффективности предложенной методики идентификации.

**Методы исследований.** Теоретические исследования и поставленные в работе задачи решаются с применением аппарата преобразований Фурье, базируются на использовании математического моделирования, теории автоматического управления, теории электропривода, теории вероятностей и анализа статистических данных, методов статистической динамики, численных методов.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

- предложена методика параметрической идентификации электроприводов, которая позволяет определять динамические характеристики системы в процессе ее эксплуатации под действием сигналов управления, рассматриваемых как случайные процессы;

- разработан комплекс программ, в котором реализованы методы и алгоритмы стохастической параметрической идентификации электропривода как динамической системы;

- исследована сходимостъ протекающих процессов при увеличении количества испытаний и времени наблюдения;

- даны рекомендации по выбору оптимального интервала испытаний на основе априорной информации об исследуемом электроприводе;

- исследована зависимость ошибки идентификации от параметров системы и интервала наблюдений;

- даны рекомендации по построению стохастических систем параметрической идентификации электроприводов.

**Практическая ценность** работы состоит в том, что ее результаты могут быть использованы для создания систем диагностирования электроприводов на стадии эксплуатации, а разработанные методы и программные средства, позволяют в реальном времени определять параметры и состояние электропривода в процессе его функционирования. Предложенная методика может быть использована на производстве, в научных исследованиях, при приемо-сдаточных испытаниях в ремонтно-производственных организациях.

**Достоверность** основных теоретических положений подтверждается экспериментальными исследованиями, проведенными на основе частотно-регулируемого асинхронного электропривода.

### **На защиту выносятся:**

- подход к решению задачи параметрической идентификации электропривода, основанный на анализе статистических характеристик его входных и выходных переменных;
- методика экспериментального определения динамических параметров электропривода в рабочих режимах;
- оценка точности и сходимости стохастического метода параметрической идентификации в зависимости от динамических параметров электропривода, интервала наблюдений и частоты дискретизации сигнала;
- комплекс прикладных программ, предназначенный для экспериментального определения динамических параметров систем электропривода.

### **Внедрение работы**

Основные теоретические и практические результаты работы использованы на ОА «Вологодский оптико-механический завод» при исследовании электроприводов металлорежущих станков.

Материалы диссертации, а также разработанное программное обеспечение используются в учебном процессе Вологодского государственного технического университета при обучении студентов специальности 140604 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов».

**Апробация работы.** Теоретические положения и основные результаты работы докладывались и обсуждались на научном семинаре секции «Электромеханические системы и средства управления ими» Международной энергетической академии и Российского научно-технического общества электротехники и электроэнергетики, СПб ГУ ИТМО, г. Санкт-Петербург, 2006; на Всероссийских научных конференциях студентов и аспирантов «Молодые исследователи – регионам», г. Вологда, 2002-2005 гг.; в трудах VII, VIII и XII Международной электронной научной конференции «Современные проблемы информатизации в технике и технологиях», г. Воронеж, 2002-2006 гг.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 8 работ,

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа общим объемом в 178 стр. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 115 наименований, и 3 приложений. Основная часть работы выполнена на 117 страницах машинописного текста. Работа содержит 47 рисунков, 6 таблиц и 61 страниц приложений.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** показана актуальность проводимых исследований, определены цель и задачи работы, сформулированы предложения выносимые автором на защиту.

**Первая глава** посвящена анализу проблем идентификации параметров электропривода и выбору рационального метода идентификации в условиях промышленной эксплуатации.

В современном замкнутом электроприводе для управления электромагнитным моментом двигателя в установившихся и переходных режимах одновременно организуется регулирование трех переменных: модулей двух пространственных векторов (тока и магнитного потока) и угла между этими векторами. В общем случае эта задача успешно решается в системах векторного управления, но в зависимости от типа электродвигателя она может реализовываться в самой электрической машине или в системе управления приводом.

Задачи оптимизации замкнутого электропривода постоянного тока сводятся, как правило, к созданию многоконтурных систем подчиненного регулирования, настраиваемых по выбранным критериям качества. Для замкнутых контуров тока и скорости используют различные критерии оптимизации, приводящие к различным настройкам регуляторов, последовательно включенных в контур управления. Например, при настройке на модульный оптимум, передаточная функция замкнутого контура скорости для двигателя постоянного тока определяется выражением

$$W_{з.с}(p) = \frac{1/K_{о.с}}{4T_{\mu}pD_T(p) + 1}, \quad (1)$$

где  $D_T(p) = 2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1) + 1$  – характеристический полином оптимизированного замкнутого контура тока;  $T_{\mu} = T_{II}$  – малая постоянная времени;  $K_{о.с}$  – коэффициент обратной связи по скорости двигателя.

Характеристические полиномы замкнутого контура скорости обычно имеют третий и четвертый порядки. В практических расчетах эти полиномы заменяют без значительной погрешности на полиномы второго порядка, пренебрегая в контуре тока малой постоянной времени  $T_{\mu}$  или принимая контур тока за безынерционный ( $D_T(p) = 1$ ).

В вентильных электроприводах с синхронными двигателями управление производится по сигналам датчика положения ротора. Система управления электроприводом обеспечивает ориентацию пространственного вектора по оси, ортогональной вектору магнитного потока, стабилизирует величину модуля вектора магнитного потока ротора и регулирует модуль вектора тока. В результате, задачи оптимизации и синтеза регуляторов в электроприводах с вентильными двигателями решаются теми же методами, что и в электроприводах с двигателями постоянного тока.

Задачи управление электромагнитным моментом асинхронного двигателя решаются в микропроцессорной системе управления электропривода. В таких системах при синтезе систем управления выполняют линеаризацию модели асинхронного двигателя, компенсируя

взаимное влияние переменных, формирующих момент и стабилизируя амплитуду одной из переменных. Обычно стабилизируют потокосцепление как наиболее инерционную переменную. В результате динамические модели асинхронных электроприводов различных типов приводятся к многоконтурным структурам, и задачи синтеза алгоритмов и систем управления решаются традиционными методами теории автоматического управления.

В конечном итоге, вне зависимости от типа электрической машины, замкнутый электропривод можно рассматривать как линеаризованную многоконтурную систему, оптимизированную по выбранному критерию качества, поведение которой достаточно точно описывается дифференциальными уравнениями с известной структурой.

Однако расчет и оптимизация электропривода всегда происходит с некоторой степенью неопределенности. Решение множества частных задач при проектировании требует знания точных значений многих параметров двигателей и механизмов, которые не всегда доступны разработчику на стадии проектирования. Эти параметры в большинстве справочников не приводятся, приводятся не полностью или являются недостаточно точными.

На этапе эксплуатации в условиях, отличных от номинальных, настройки электропривода могут меняться и, в результате, возникает задача определения обобщенных параметров с целью уточнения настроек регуляторов. Использование детерминистских методов параметрической идентификации в таких условиях, зачастую, невозможно. Одним из способов решения проблемы является стохастический метод идентификации, который позволяет определять динамические характеристики системы в процессе ее нормальной работы под воздействием сигналов управления, рассматриваемых как случайные процессы. В таком случае исследуемый электропривод можно рассматривать как сложную систему с вероятностно-статистическим характером происходящих в них процессов, в противоположность обычно принятому детерминированному подходу.

**Во второй главе** рассматриваются теоретические вопросы метода стохастической идентификации.

Применительно к анализу электроприводов стохастический метод идентификации имеет целый ряд достоинств:

1) идентификацию можно производить по записям реализаций значений сигналов, получаемых в процессе функционирования электропривода в нормальном режиме;

2) метод не требует априорных сведений об идентифицируемом процессе;

3) метод позволяет выяснить на основе наблюдений над большим количеством данных, как изменялся один исследуемый параметр в зависимости от другого, и дает возможность определить степень влияния различных факторов на взаимосвязь исследуемых процессов;

4) метод не имеет ограничений на порядок дифференциального уравнения, число и характер переменных параметров.

Наиболее важными характеристиками динамических случайных процессов, используемыми при идентификации, являются:

- корреляционная функция сигнала с конечной энергией, которая представляет собой интеграл от произведения двух копий сигнала, сдвинутых друг относительно друга на время  $\tau$ :

$$K_x(\tau) = \overline{x(\tau) \cdot x(t+\tau)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(\tau) \cdot x(t+\tau) dt, \quad (2)$$

- его спектральная плотность мощности, имеющая смысл плотности распределения дисперсии случайного процесса по частотам непрерывного спектра:

$$S_x(\omega) = \lim_{\Delta\omega \rightarrow \infty} \frac{D_V(\omega_V)}{\Delta\omega}, \quad (3)$$

где  $D_V$  - дисперсия случайного процесса.

Согласно теореме Винера-Хинчина, корреляционная функция случайного процесса и его спектральная плотность мощности связаны между собой преобразованием Фурье:

$$K(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega, \quad (4)$$

$$W(\omega) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau) e^{j\omega\tau} d\tau. \quad (5)$$

Частотная передаточная функция системы  $H(j\omega)$  связана со спектрами случайных сигналов на входе и выходе:

$$W_y(\omega) = H(j\omega)H(-j\omega)W_x(\omega) = |H(j\omega)|^2 W_x(\omega). \quad (6)$$

Последнее выражение позволяет определить динамические характеристики объекта на основе статистических характеристик его входных и выходных сигналов по схеме, представленной на рис. 1.

Для выполнения идентификации требуется обработка входного и выходного сигналов на большом (теоретически бесконечном) отрезке времени. Поэтому в методе корреляционных функций процесс предполагается стационарным и эргодическим.

Для восстановления параметров передаточной функции можно использовать ряд методов оптимизации, которые наиболее часто применяются для решения подобных задач: методы прямого поиска для функции  $n$  переменных, т.е. методы Хука-Дживса, метод демпфированного симплекса, предложенный Нелдером и Мидом, либо методы, использующие производные функции (градиентного спуска, наискорейшего спуска). Эти методы являются эффективными, обеспечивают достаточную точность и всегда имеют решение. В диссертационной работе в качестве алгоритма восстановления коэффициентов передаточной функции используется метод прямого спуска, предложенный Хуком и Дживсом, который состоит из последовательности шагов исследующего поиска вокруг базисной точки, за которой в случае успеха следует поиск по образцу. При поиске по образцу



используется информация, полученная в процессе исследования, и минимизация функции завершается поиском в направлении, заданном образцом.

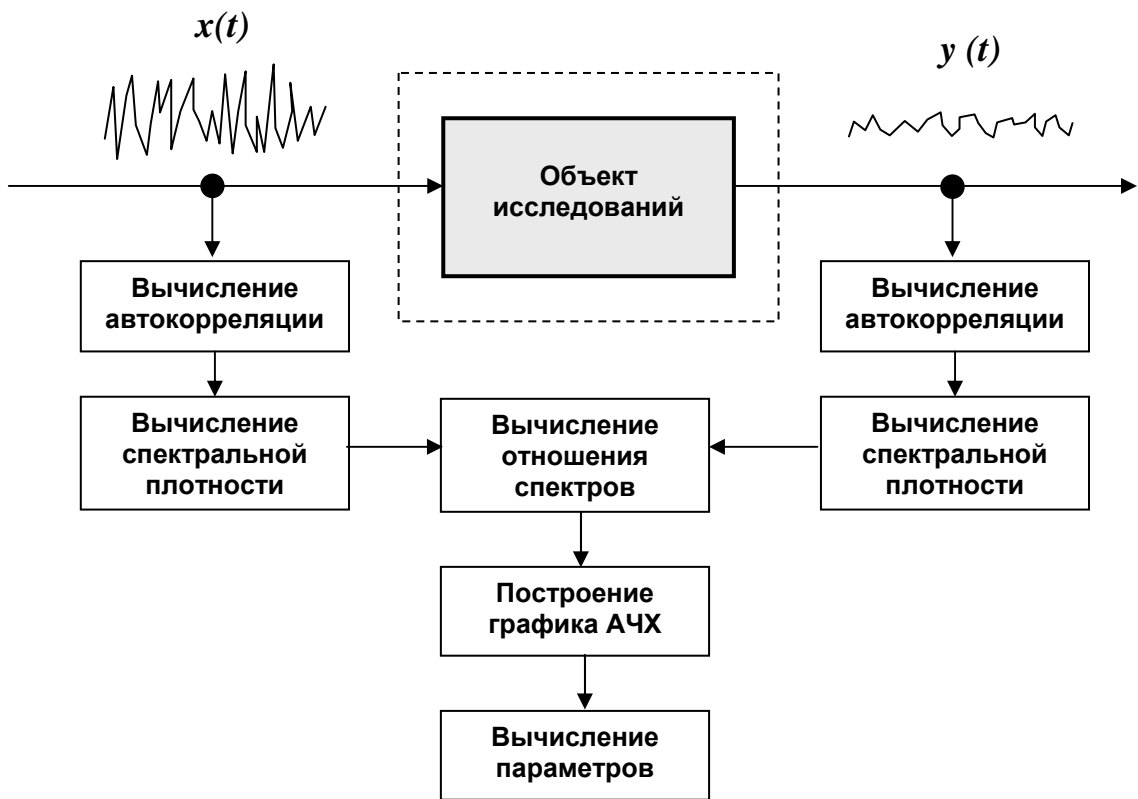


Рис. 1. Общая схема исследований

**Третья глава** посвящена экспериментальному исследованию метода статистической идентификации параметров электропривода на примере систем различного порядка. Рассматриваются вопросы сходимости метода, выбора оптимального интервала наблюдений и оценка точности идентификации на примере оптимизированного замкнутого электропривода, с характеристическим полиномом 3-го порядка.

Основные этапы исследований иллюстрируются рис. 2–4.

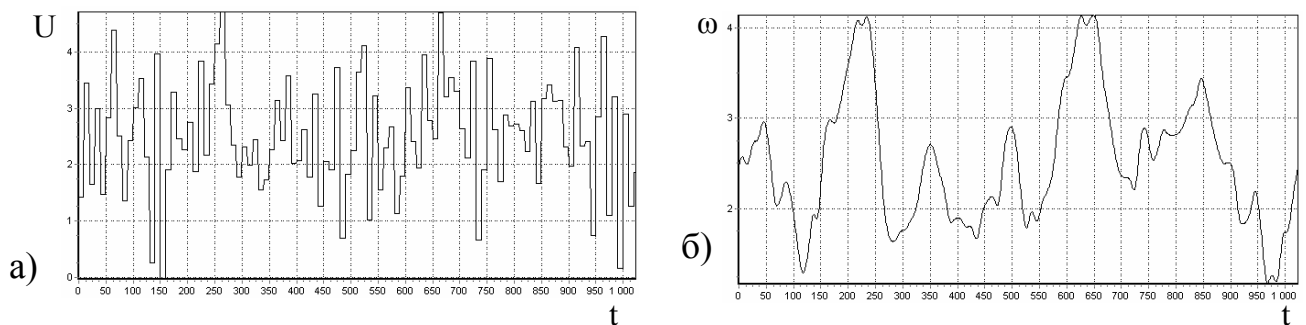


Рис. 2. Пример реализации входного (а) и выходного (б) сигнала системы третьего порядка

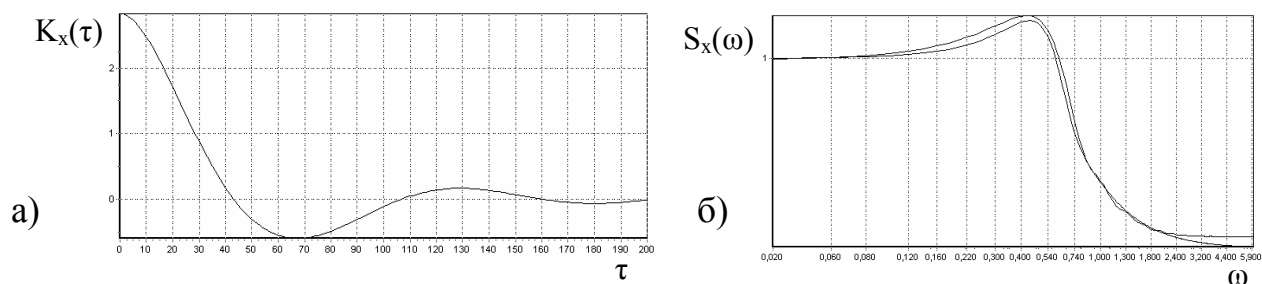


Рис. 3. Автокорреляционная функция выходного сигнала (а), усредненная по ансамблю из 100 реализаций и графики АЧХ (б) построенной в результате идентификации по формуле (6) по сравнению с графиком АЧХ реальной системы

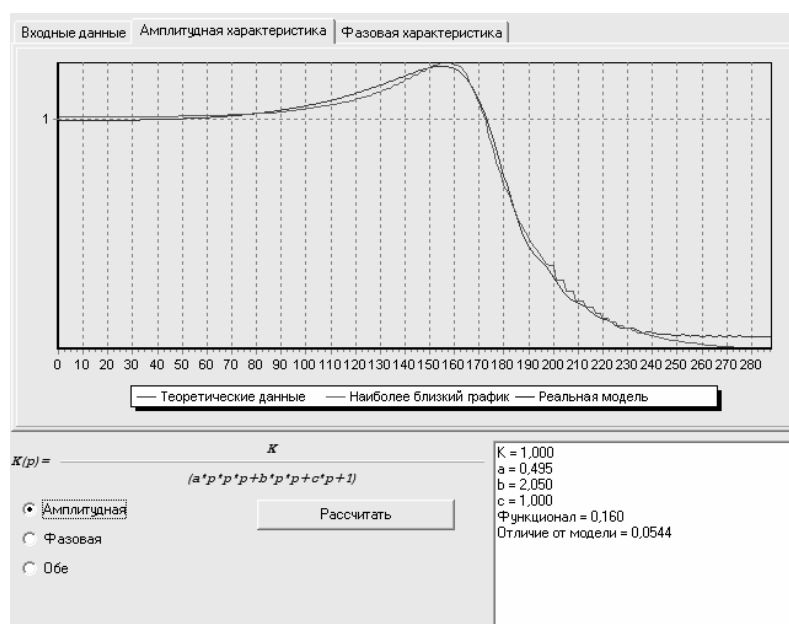


Рис. 4. Пример восстановления параметров звена

В результате применения метода, среди множества кривых, через которые может проходить график АЧХ динамической системы, выбирается кривая, которая наиболее близко проходит с графиком, построенным в результате экспериментальных исследований. В качестве восстановленных параметров звена принимаются параметры этой кривой. Точность метода оценивается по двум критериям: степень отклонения от наиболее близкой модели и степень отклонения от реально заданного звена.

Одной из задач идентификации систем является выбор оптимального интервала наблюдений, так как основная составляющая затрат на динамические эксперименты пропорциональна их длительности.

Исследована сходимость стохастического метода идентификации. С этой целью испытания проводились на разных интервалах времени. Временной интервал удваивался при каждом новом испытании.

На рис. 5 показаны графики автокорреляций и соответствующие им графики спектральных плотностей при заданном наборе испытаний. По

результатам эксперимента видно, что метод исследований сходится при увеличении временного интервала.

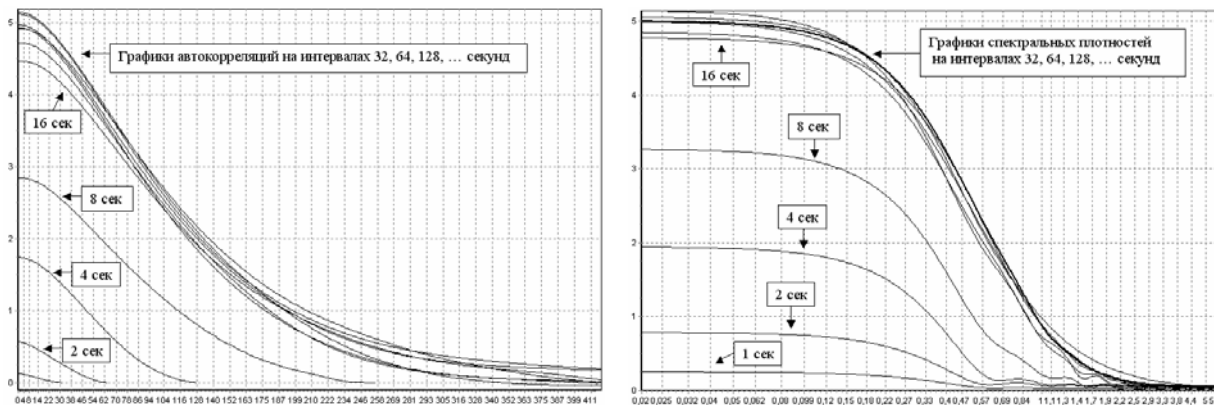


Рис. 5. Графики автокорреляций и соответствующие им графики спектральных плотностей при заданном наборе испытаний

Для выявления взаимосвязи между найденным значением и постоянными времени, фигурирующими в уравнениях динамики звеньев, была проведена серия испытаний на примерах систем различных порядков при разных постоянных времени

На основе полученных данных были выявлены следующие закономерности:

1) Метод стохастической идентификации гарантирует решение задачи при правильно выбранном интервале наблюдений.

2) Для контуров первого порядка такой интервал времени должен быть как минимум в четыре раза больше постоянной времени, характеризующей длительность протекающего процесса.

3) Для контуров 2 и 3 порядка минимальный интервал времени определяется суммированием интервалов, определенных для каждой из постоянных времени  $T_i$  соответствующих звеньев и в общем случае подчиняется формуле:

$$t_{min} = 4 \sum_{i=1}^n T_i, \quad (7)$$

где  $n$  – порядок звена.

4) При единичном испытании на интервале, выбранном по формуле (8), ошибка идентификации составляет порядка 30% для любых звеньев, как показано на рисунке 6.

5) При увеличении числа испытаний на заданном интервале среднеквадратичная ошибка пропорционально уменьшается.

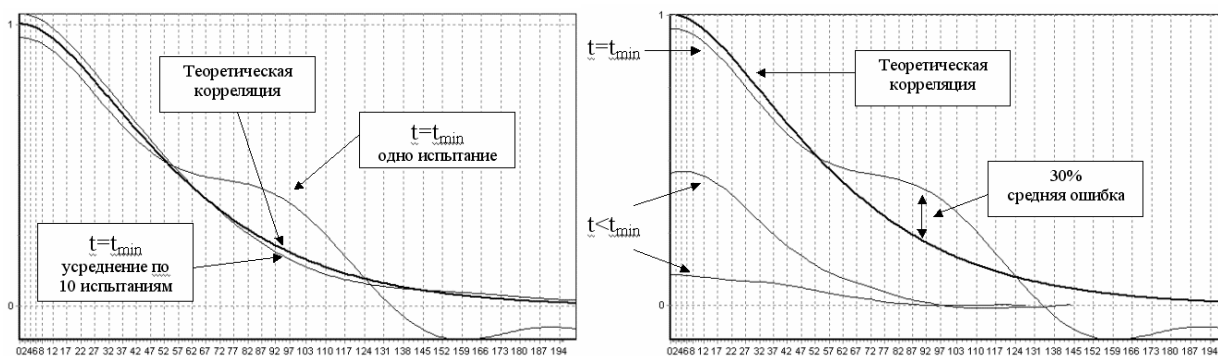


Рис. 6. Изменения автокорреляционной функции в зависимости от длины интервала и количества испытаний

**В четвертой главе** рассматривается применение метода статистической идентификации для экспериментального определения параметров асинхронного частотно-регулируемого электропривода типа ЭЧРЗ-4,0-380-УХЛ4.

В основе функциональной схемы преобразователя ЭЧРЗ-4 лежит классическая система скалярного управления: неуправляемый выпрямитель (В) – автономный инвертор напряжения (АИН). Управление инвертором осуществляется при помощи специализированного микроконтроллера по закону двухполярной синусоидальной сплошной модуляции. Управление преобразователем частоты осуществляется сигналом от 0 до 5 В, поступающим на аналоговый вход микроконтроллера. Преобразователь настраивается по критерию  $U/F = const$ . Кроме того, в структуру электропривода входят: асинхронный двигатель (АД) 4А100Л4У3, мощностью 4 кВт, фотоэлектрический датчик скорости ВЕ-178А, имеющий 1000 импульсов на оборот.

Персональный компьютер, отвечающий за сбор и обработку информации, снабжен платой аналого-цифрового преобразователя L-783 производства фирмы L-Card.

Система дает возможность исследования в режиме реального времени путем отслеживания поступающих данных, хронометрирования результата и архивирования значений сигналов на жесткий диск компьютера.

Для обеспечения возможности идентификации параметров исследуемого электропривода в реальном времени решались три параллельные задачи:

- задание управляющего воздействия;
- прием сигнала с датчика скорости;
- идентификация параметров электропривода.

Параллельность вычислений обеспечена за счет создания многопоточного приложения, функционирующего в операционной системе Windows.

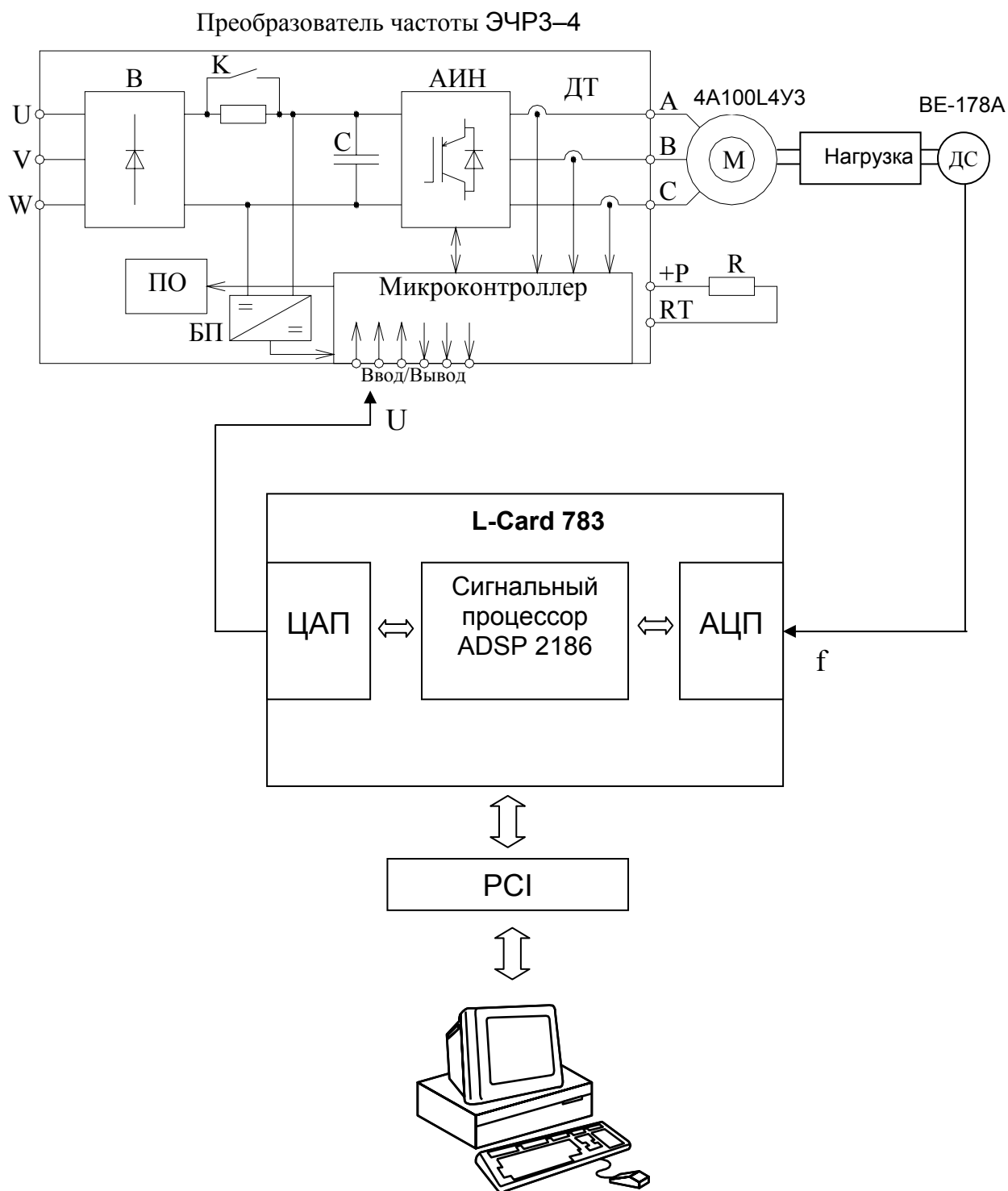


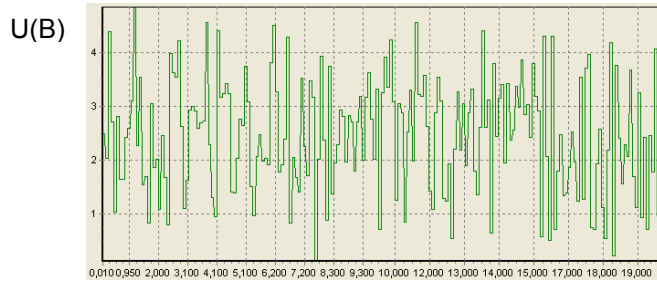
Рис 7. Функциональная схема стенда

На рисунке 8. показаны результаты анализа статистических характеристик случайных процессов при различных видах входных воздействий.

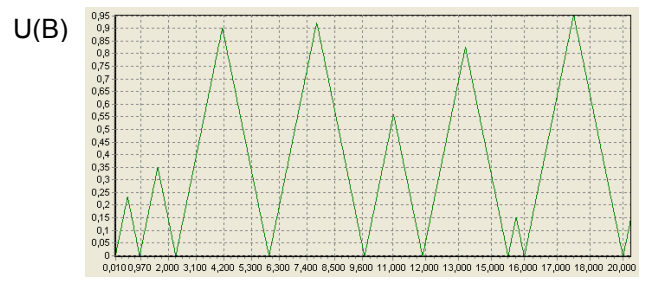
*Изменение скорости вращения двигателя в случайные моменты времени*

*Плавный разгон и торможение двигателя в случайные интервалы времени*

Графики входного сигнала

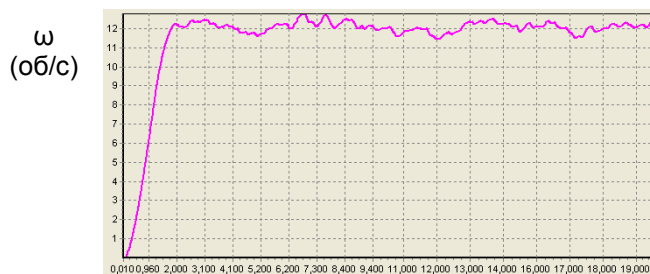


t(c)

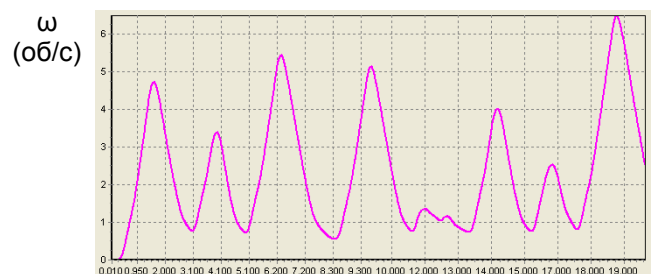


t(c)

Графики выходного сигнала

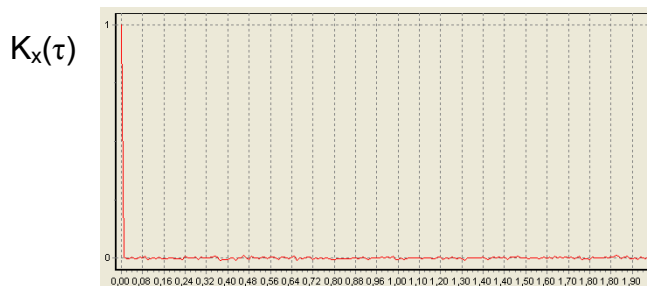


t(c)

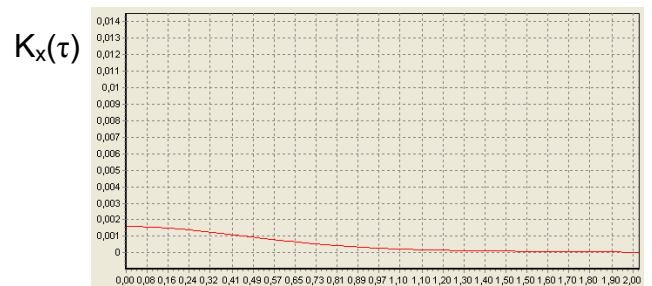


t(c)

Автокорреляционные функции входного сигнала

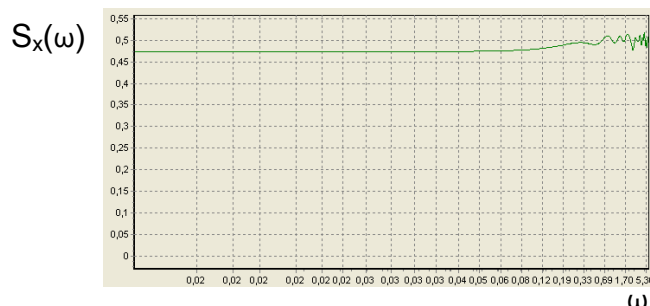


τ (с)

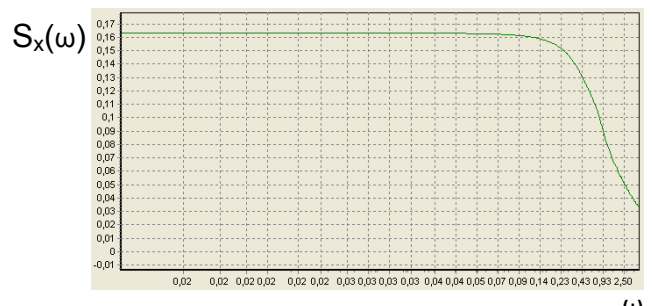


τ (с)

Спектральные плотности входного сигнала



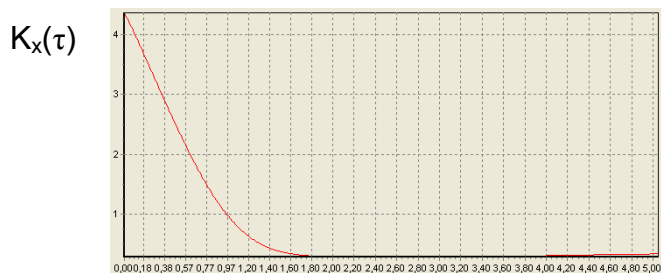
ω



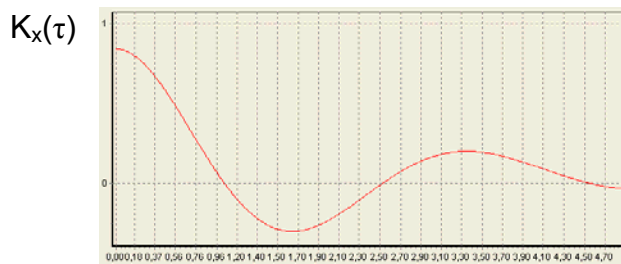
ω

Рис 8. Пример построения статистических характеристик при различных видах случайных воздействий

## Автокорреляционные функции выходного сигнала

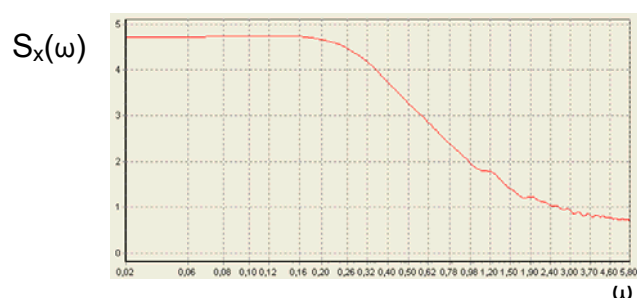


τ (с)

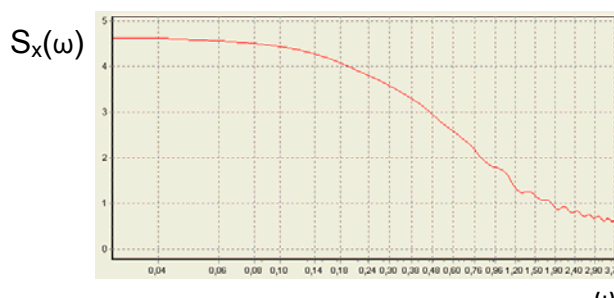


τ (с)

## Спектральные плотности выходного сигнала



ω



ω

Продолжение рис. 8

Для восстановления параметров передаточной функции в качестве входных данных метода Хука-Дживса задается аппроксимация звеном третьего порядка.

Естественно будет предположить, что точность восстановления малых постоянных времени напрямую зависит от частоты дискретизации. С целью исследования этой взаимосвязи была проведена серия испытаний, оценены восстановленные параметры звена в зависимости от частоты дискретизации сигнала.

На основе полученных результатов показано, что с увеличением частоты дискретизации уменьшается среднеквадратичное отклонение при восстановлении параметров, а значение самих параметров уточняется.

Таблица 1

Восстановленные параметры асинхронного электропривода

Число отсчетов в секунду	$K \left( \frac{\text{об/с}}{B} \right)$	$T_1 \text{ (сек)}$	$T_2 \text{ (сек)}$	$T_3 \text{ (сек)}$
10	3,634	1,534	0,00	0,00
50	4,056	1,756	0,00	0,00
100	4,134	1,734	0,10	0,00
1000	4,556	1,865	0,11	0,00
10000	4,734	1,834	0,10	0,01
100000	4,815	1,956	0,09	0,01

В результате идентификации видно, что достаточно четко выявляется большая постоянная времени  $T_1$ , которую можно соотнести с постоянной времени датчика интенсивности, входящего в состав преобразователя.

Малые постоянные времени  $T_2$  и  $T_3$  начинают выявляться, если их размерность не превышает половины частоты дискретизации. Это соотношение известно под названием частоты Найквиста.

В зависимости от соотношения между размерностью постоянной времени и частотой Найквиста возможны три случая:

- 1) если постоянная времени меньше частоты Найквиста, то дискретные отсчеты не позволяют правильно восстановить эту постоянную;
- 2) если постоянная времени равна частоте Найквиста, то возможно восстановление постоянной, хотя полученные данные могут быть искажены;
- 3) если постоянная времени больше частоты Найквиста, то восстановленная по дискретным отсчетам постоянная времени выявляется довольно отчетливо.

На рис. 9 показаны результаты испытаний при разных значениях уставки датчика интенсивности в пределах от 10 до 50 Гц/с и оценено влияние датчика интенсивности на параметры электропривода.

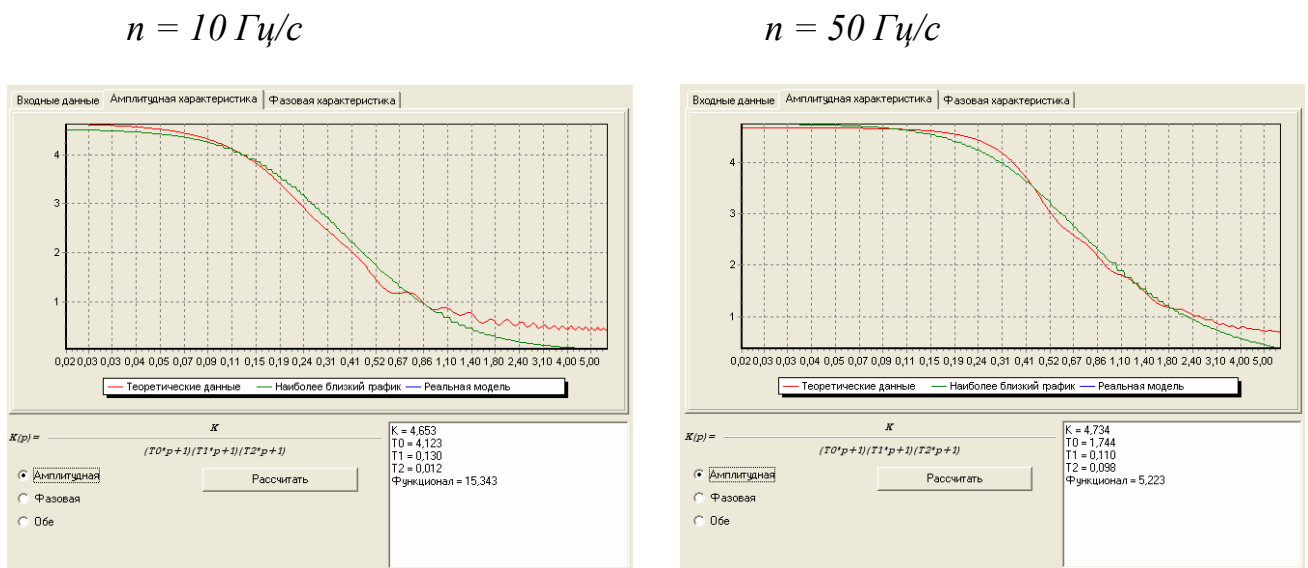


Рис. 9. Пример идентификации параметров асинхронного электропривода при различных значениях уставки датчика интенсивности

Анализ полученных графиков подтверждает, что выявленная постоянная времени  $T_0$  напрямую зависит от уставки датчика интенсивности.

Проведенные экспериментальные исследования на примере электропривода с асинхронным двигателем подтверждают возможность применения стохастического метода для идентификации параметров любых систем электропривода.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе представлены основные положения и результаты, связанные с исследованием и разработкой способов, алгоритмов и программного обеспечения для экспериментального определения параметров электроприводов стохастическим методом, которые заключаются в следующем:

1) В результате анализа подходов к проблеме идентификации параметров электроприводов показано, что одним из способов решения проблемы является стохастический метод идентификации, который позволяет определять динамические характеристики системы в процессе ее нормальной работы под воздействием сигналов управления, рассматриваемых как случайные процессы. В таком случае исследуемый электропривод можно рассматривать как сложную систему с вероятностно-статистическим характером происходящих в них процессов, в противоположность обычно принятому детерминированному подходу.

2) Разработана и теоретически обоснована методика экспериментального определения динамических параметров исследуемого электропривода стохастическим методом.

3) Разработан унифицированный программный комплекс, обеспечивающий информационную и алгоритмическую поддержку процесса исследования, и проведен анализ методики на различных примерах и электроприводах со стандартными настройками.

4) Показано, что метод статистической идентификации устойчиво сходится при увеличении количества испытаний.

5) Проведена оценка точности метода на основе априорной информации о системе, интервала наблюдений и частоты дискретизации сигнала. В результате экспериментов выявлено, что для точного восстановления параметров исследуемого объекта идентификации интервал испытаний может быть спрогнозирован.

6) Эмпирически установлено, что при единичном испытании на минимально заданном интервале испытаний ошибка идентификации для систем любого порядка примерно равна 30%, и при увеличении числа испытаний пропорционально уменьшается.

7) В результате экспериментального применения метода стохастической идентификации на основе асинхронного частотно-регулируемого электропривода подтверждено, что точность восстановления параметров звена зависит от частоты дискретизации, а в случае восстановления малых постоянных времени напрямую зависит от частоты Найквиста.

**По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

1. Водовозов А.М. Интерфейсный подход к задаче оптимизации электропривода / А.М. Водовозов, Д.А. Оботуров, А.А. Пискунов // Современные проблемы информатизации в технике и технологиях: Труды VII Международной электронной научной конференции. – Воронеж: ЦЧКИ, 2002. – С. 7-8.
2. Оботуров Д.А. Лабораторный стенд для исследования электроприводов / Д.А. Оботуров, А.А. Пискунов // Молодые исследователи – региону: Материалы Всероссийской научной конференции студентов и аспирантов. – Вологда: ВоГТУ, 2002. – С. 233-234.
3. Блинов С.А. Стенд для исследования приводов переменного тока / С.А. Блинов, Д.А. Оботуров, А.А. Пискунов. // Современные проблемы информатизации в технике и технологиях: Труды VIII Международной электронной научной конференции. – Воронеж: ЦЧКИ, 2003. – С. 6-7.
4. Пискунов А.А. Цифровой фильтр для обработки токовых сигналов в электроприводе переменного тока / А.А. Пискунов // Молодые исследователи – региону: Материалы Всероссийской научной конференции студентов и аспирантов. – Вологда: ВоГТУ, 2003. – С. 184-186.
5. Пискунов А.А. Параметрическая идентификация линейной дискретной системы статистическими методами / А.А. Пискунов // Молодые исследователи – региону: Материалы Всероссийской научной конференции студентов и аспирантов. – Вологда: ВоГТУ, 2005. – С. 331-333.
6. Водовозов А.М. О сходимости метода статистической идентификации параметров динамических систем / А.М. Водовозов, А.А. Пискунов // Информационные технологии моделирования и управления. – Воронеж, 2005. – №4(22). – С. 530-534.
7. Пискунов А.А. Определение параметров асинхронного электропривода методом статистической идентификации / А.А. Пискунов // Информационные технологии моделирования и управления. – Воронеж, 2006. – №7(25). – С. 965-969.
8. Пискунов А.А. О выборе оптимального интервала испытаний в методе статистической идентификации параметров динамических систем / А.А. Пискунов, А.М. Водовозов // Современные проблемы информатизации в технике и технологиях: Труды XI Международной электронной научной конференции. – Воронеж: ЦЧКИ, 2006. – С. 297-298.