

Работа выполнена на кафедре прикладной математики и информатики в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная математика и информатика» ФГОУ ВПО УлГТУ
Клячкин Владимир Николаевич

Официальные оппоненты: **Васильев Константин Константинович**, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, ФГОУ ВПО УлГТУ, зав. кафедрой «Телекоммуникации»,

Капитанчук Василий Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Ульяновское высшее авиационное училище гражданской авиации (институт)», доцент кафедры информатики

Ведущая организация: **Ульяновский филиал ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук**

Защита состоится «25» декабря 2013 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.277.01 при Ульяновском государственном техническом университете по адресу: Ульяновск, ул. Северный Венец, 32 (ауд. 211, Главный корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ульяновского государственного технического университета.

Автореферат разослан «___» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

В.И. Смирнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Основной задачей диагностики состояния технического объекта является обеспечение его безопасности, функциональной надёжности и эффективности работы, а также сокращение затрат на техническое обслуживание и уменьшение потерь от простоев, связанных с отказами и ремонтом. Система управления техническим объектом часто включает подсистему мониторинга множества его параметров: решение по управлению объектом принимается с учетом состояния объекта. Выход контролируемых параметров за «коридор» допустимых значений может привести к возникновению аварийной ситуации. Эффективность работы такой подсистемы определяется вероятностью принятия ошибочного решения и коэффициентом готовности, которые существенно зависят от точности прогнозирования параметров.

В процессе мониторинга значения контролируемых параметров регистрируются через определенные промежутки времени и образуют систему временных рядов (например, в системе автоматического управления гидроагрегатом, - это показания распределенной сети датчиков относительной и абсолютной вибрации, датчиков измерения скорости вращения вала и другие). Для этой системы временных рядов строятся соответствующие математические модели. На базе полученных моделей возможно прогнозирование изменения характеристик и обнаружение нарушений процесса до того, как контролируемые параметры вышли за допустимые значения. На основе этой информации принимается соответствующее решение, связанное со снижением нагрузки на объект.

В настоящее время прогнозирование параметров, характеризующих состояние технического объекта, в системах управления производится, как правило, на основе моделей авторегрессии – проинтегрированного скользящего среднего. При этом часто соответствующие временные ряды анализируются независимо, несмотря на возможную коррелированность рассматриваемых характеристик. Обычно не проверяется соблюдение основных предположений регрессионного анализа и не используются соответствующие методы адаптации к их нарушениям, что может привести к существенным погрешностям при прогнозировании показаний. При быстром изменении состояния контролируемой системы во времени это приводит к поступлению в систему управления недостоверной информации о состоянии технического объекта и нарушает обратную связь в управлении при эксплуатации техники.

Таким образом, существующие подходы к обработке информации в системах управления, как правило, не обеспечивают необходимой точности прогноза, приводят к увеличению вероятности принятия ошибочного решения по управлению объектом, снижают его готовность. Повышение точности моделирования и прогнозирования значений характеристик технического объекта является важной задачей, обеспечивающей своевременное предупреждение о возможности аварийной ситуации; от качества решения этой задачи зависит эффективность управления и безаварийность работы объекта. Для повышения точности прогнозирования необходим анализ взаимосвязей и совместная обра-

ботка характеристик рассматриваемого объекта с адаптацией к возможным нарушениям основных предположений регрессионного анализа. А для своевременного предупреждения о возможности выхода значений контролируемых характеристик за «коридор» допустимых значений требуется автоматизация вычислительного процесса при непрерывном обновлении коэффициентов полученной модели, что даст возможность принять оперативное и обоснованное решение по предотвращению аварийной ситуации.

Объектом исследования являются контролируемые параметры системы управления техническим объектом, поведение которых необходимо спрогнозировать на основе моделей в виде системы временных рядов.

Предметом исследования являются математические модели, алгоритмы и программы для системы управления техническими объектами на основе взаимосвязанных временных рядов параметров, характеризующих состояние объекта управления.

Цель работы

– повышение эффективности системы управления техническим объектом и предотвращение аварийных ситуаций на основе прогнозирования характеристик его работы путем разработки математических моделей, алгоритмов и программного обеспечения для систем временных рядов с использованием адаптивного динамического регрессионного моделирования.

Для достижения поставленной цели решаются задачи:

- анализ существующих методов контроля параметров в системах управления техническими объектами с использованием временных рядов;
- разработка алгоритмов прогнозирования характеристик состояния технического объекта на основе адаптивного динамического регрессионного моделирования;
- построение процедур динамического обновления коэффициентов полученных моделей для обеспечения достоверности информации о состоянии технического объекта, поступающей в систему управления;
- разработка комплекса программ для реализации алгоритмов моделирования и прогнозирования состояния объекта управления;
- анализ эффективности разработанных алгоритмов на примере системы управления реальным техническим объектом в нормальных и специальных условиях.

Методы исследования

При решении поставленных задач в диссертационной работе использовались методы теории вероятностей, математической статистики, теории автоматического управления, контроля динамических систем, анализа временных рядов и численные методы. При разработке программного обеспечения применялись методы объектно-ориентированного проектирования программных систем.

Научная новизна основных результатов работы, выносимых на защиту

1. Разработаны алгоритмы, обеспечивающие повышение эффективности системы управления техническими объектами, на основе новых моделей временных рядов характеристик состояния объекта, в которых учтена их взаимосвязь и использовано адаптивное динамическое регрессионное моделирование.

2. Для получения более достоверной информации о состоянии технического объекта впервые применена процедура динамической настройки полученной модели прогноза путем периодического псевдоградиентного обновления её коэффициентов.

3. Разработанный программный комплекс обеспечивает автоматизацию моделирования и прогнозирования систем временных рядов параметров технического объекта с целью принятия решения по предотвращению аварийных ситуаций.

4. Эффективность применения разработанных алгоритмов и программного обеспечения подтверждена на примере их использования в системе управления гидроагрегатами Чирюртовской ГЭС-1 (республика Дагестан) и Краснополянская ГЭС (Краснодарский край) в нормальных и специальных условиях (режим работы в сети и режим запуска): среднее время вынужденного простоя, связанного с реагированием на аварийные ситуации, сокращается в 2 – 3 раза.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанный программный комплекс, созданный на основе предложенных алгоритмов и методики структурно-параметрической идентификации систем временных рядов, может быть использован в производственной и научной деятельности для повышения точности и эффективности функционирования систем управления по сравнению со стандартными методами.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении гранта по Федеральной целевой программе "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России"; тема «Разработка информационно-математической системы раннего предупреждения об аварийной ситуации по множеству характеристик состояния технического объекта» (соглашение 14.В37.21.672).

Результаты работы внедрены на ОАО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения» при многомерном статистическом контроле и прогнозировании показателей вибраций в системе управления гидроагрегатом Краснополянской ГЭС.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе Ульяновского государственного технического университета в дисциплинах «Контроль качества и надежность» и «Математическое моделирование», читаемых студентам специальности «Прикладная математика», «Надежность технических систем» для специальности «Инженерная защита окружающей среды» и «Статистические методы управления качеством» для специальности «Управление качеством».

Достоверность. Достоверность положений диссертации обеспечивается корректным использованием математических методов и подтверждается результатами статистических испытаний, а также эффективностью функционирования алгоритмов и программного обеспечения при внедрении.

Апробация работы. Теоретические положения и практические результаты работы докладывались и обсуждались на ежегодных научно-технических конференциях Ульяновского государственного технического университета в 2009 – 2013 г.г., а также на международных и всероссийских конференциях: Всероссийском семинаре «Нейроинформатика, ее приложения и анализ данных» (Красноярск, 2009 г.), международной конференции «Математическое моделирование в образовании, науке и производстве» (Тирасполь, 2009 г.), международной конференции «Математическое моделирование физических, технических, экономических, социальных систем и процессов» «Инноватика-2009» (Ульяновск, 2009 г.), международной научно-практической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления» (Коломна, 2009 г.), третьей и четвертой Российской научно-технической конференции аспирантов, студентов и молодых ученых «Информатика и вычислительная техника» (Ульяновск, 2011, 2012 гг.), международной конференции «Системные проблемы надежности, качества, информационно-телекоммуникационных и электронных технологий в инновационных проектах» (Сочи, 2012 г.), Всероссийской школле-семинаре аспирантов, студентов и молодых ученых "Информатика, моделирование, автоматизация проектирования" (Ульяновск, 2012 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем» (Ульяновск, 2013 г.).

Публикация результатов работы. Результаты исследований по теме диссертации изложены в 12 опубликованных работах, в том числе в трех статьях в изданиях из перечня ВАК; получены два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения с копиями актов о внедрении результатов работы. Основное содержание изложено на 153 страницах, включая 30 рисунков и 7 таблиц. Список литературы включает 120 наименований использованных литературных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения об использовании, реализации и апробации результатов работы.

В первой главе выполнен обзор систем управления техническим объектом, методов и проблем управления. На рис. 1 показана типовая схема системы управления на примере гидроагрегата. Данные по вибрациям от гидроагрегата

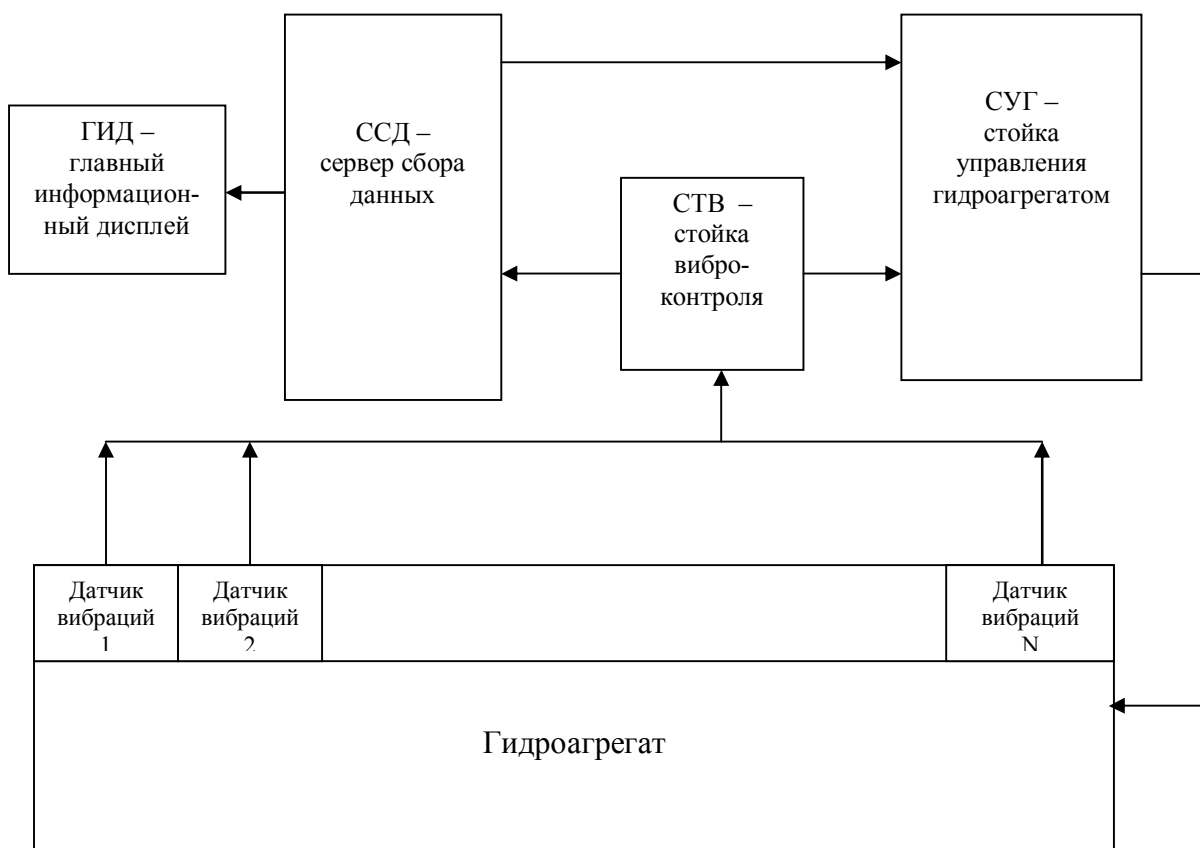


Рис. 1. Виброконтроль в составе системы автоматического управления гидроагрегатом

поступают через стойку виброконтроля на сервер сбора данных и в виде дискретного сигнала в режиме реального времени на стойку управления гидроагрегатом, с помощью которой изменяется нагрузка или происходит останов агрегата.

При работе объекта изменяются значения контролируемых характеристик. Эти значения представляют систему временных рядов. Проведенный анализ методов моделирования и прогнозирования систем временных рядов параметров при управлении техническим объектом показал, что для исследования характеристик состояния объекта применяются различные численные методы построения полиномов, сплайнов, регрессионного, гармонического анализа применительно к моделям авторегрессии, скользящего среднего, комбинированным моделям авторегрессии - проинтегрированного скользящего среднего и другие.

При обработке многомерных временных рядов классическими методами не только не проверяется соблюдение основных предположений регрессионного анализа, но и не используются соответствующие методы адаптации к их нарушениям. В разработанных методах и подходах обработки систем временных рядов часто не используется имеющийся в теории инструментарий для совместного описания систем рядов в условиях их взаимосвязи и зависимости, что в итоге приводит к снижению точности описания и прогнозирования динамики поведения технического объекта. Существует проблема обновления моделей, необходимого для учета новых непрерывно поступающих данных.

В первой главе также представлен обзор программного обеспечения для обработки временных рядов: рассмотрены как универсальные пакеты SPSS, Minitab, Statgraphics, STATISTICA, SAS, S-Plus, в которых представлены все самые распространенные методы статистического анализа данных, так и специализированные пакеты, ориентированные на анализ временных рядов.

Показано, что не существует универсального программного пакета по совместной обработке временных рядов, обеспечивающего необходимую точность моделирования и прогнозирования изменения характеристик для раннего предупреждения об аварийной ситуации, а также автоматизации динамического обновления коэффициентов полученных моделей.

В связи с изложенным, актуальной задачей является разработка алгоритмов и программного обеспечения для систем управления техническими объектами на основе более точного прогнозирования состояния объекта управления с целью раннего предупреждения об аварийной ситуации и принятия соответствующего решения по управлению. В диссертации эта задача решается с использованием адаптивного динамического регрессионного моделирования.

Во второй главе предложены два подхода к разработке алгоритмов для системы управления при прогнозировании состояния объекта управления на основе взаимосвязанных временных рядов.

Описание алгоритма оценки состояния технического объекта с помощью адаптивных регрессий.

Рассмотрим технический объект, состояние которого характеризуется параметрами, значения которых регистрируются через определенные промежутки времени и образуют систему временных рядов, которую можно записать в виде $y(t) = \{y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_n)\}$, где параметр t указывает на момент времени, в который зафиксировано значение, или номер наблюдения.

Рассмотрим N временных рядов $y^1(t), y^2(t), \dots, y^N(t)$ (N - количество контролируемых параметров). Построим модели адаптивных регрессий для каждого временного ряда системы. В качестве регрессоров используются временные ряды исходной системы. Математически приведенная форма данной модели — это система N уравнений, описывающая зависимость характеристик временного ряда y от факторов (регрессоров) y_1, \dots, y_{p_j} ($j = \overline{1, N}$): на каждый от-

клик y_j может оказывать влияние не более $N - 1$ регрессора y_k ($k \neq j; k = \overline{1, N}$), при этом количество регрессоров p_j в каждой модели различно. Система имеет вид:

$$\begin{cases} y_1 = y_2 \beta_{11} + y_3 \beta_{13} + \dots + y_{p_1} \beta_{1 p_1} + \varepsilon_1 \\ y_2 = y_1 \beta_{21} + y_3 \beta_{23} + \dots + y_{p_2} \beta_{2 p_2} + \varepsilon_2 \\ \dots \\ y_N = y_1 \beta_{N1} + \dots + y_{p_N} \beta_{N p_N} + \varepsilon_N \end{cases} \quad (1)$$

Алгоритм поиска оптимальной структуры модели зависит от значения p_j . Обычно при $p_j \leq 20$ возможен полный перебор структур, которых насчитывается до 2^{20} . При $p_j > 20$ используются методы пошаговой регрессии, случайного поиска и другие подходы.

Точность аппроксимации σ (внутреннее среднеквадратическое отклонение) и прогнозирования σ_{Δ} (внешнее среднеквадратическое отклонение) рассчитываются по формулам:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-p)}}, \quad (2)$$

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{(k-1)}}, \quad (3)$$

где n – количество наблюдений, k – объем контрольной выборки (обычно 10% от количества наблюдений), p – число параметров в соответствующем уравнении модели (1), y_i – результат i -го наблюдения, \hat{y}_i – прогнозируемое значение

отклика по построенной модели, $\Delta_i = y_i - \hat{y}_i$, $\bar{\Delta} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta_i$ ($i = \overline{1, k}$).

После построения моделей проверяется соблюдение условий применения регрессионного анализа: определенность модели; независимость регрессоров; нормальность распределения ошибок; нулевое значение математического ожидания ошибок; постоянство дисперсии; независимость ошибок.

Избыточные члены модели находятся с помощью t – критерия. Мультиколлинеарность проще всего обнаруживается по коэффициентам парной корреляции. Адаптация к нарушению данного условия применяется на каждом этапе процесса моделирования: при постулировании модели, оценивании параметров и поиске оптимального набора факторов. С целью максимального ослабления влияния взаимозависимости регрессоров используются центрирование данных и далее – устойчивые к мультиколлинеарности вычислительные схемы метода наименьших квадратов (методы Гаусса-Жордана и Хаусхолдера). Для проверки нормальности распределения ошибок применяются статистические критерии (хи-квадрат, Шапиро-Уилка и другие). Адаптация к нарушению предположения о нормальности выполняется применением робастных методов. Нарушение условия однородности наблюдений или постоянства дисперсии проверяется по графикам остатков. Наряду с графическим методом, применим тест Энгла. Для проверки нарушения условия независимости ошибок используется критерий Дарбина – Уотсона.

Для построения комплексного прогноза по каждому параметру, необходимо знать прогнозное значение регрессоров, от которых данный параметр зависит, т.е. регрессоров, входящих в каждое уравнение системы (1). Прогнозные значения регрессоров получены на основе одномерных динамических регрессий, для этого к каждому из регрессоров был применен подход адаптивного ди-

намического регрессионного моделирования. В соответствии с этим подходом каждый временной ряд представляет собой сумму четырех компонент:

$$y(t) = f(t) + g(t) + \psi(t) + \varepsilon(t), \quad (4)$$

где $y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_n)$ – ряд наблюдений случайной функции; $f(t)$ – неслучайная (долговременная) функция тренда; $g(t)$ – неслучайная периодическая функция; $\psi(t)$ – случайная с элементами регулярности функция; $\varepsilon(t)$ – нерегулярная компонента (случайная величина, ошибка).

На каждом этапе проводятся построение и анализ соответствующей компоненты модели временного ряда, оценка точности аппроксимации и прогнозирования, диагностика свойств остатков и при необходимости – адаптация к нарушениям предположений о характеристиках этих свойств.

Описание алгоритма прогнозирования состояния объекта управления на основе структурно-параметрической идентификации системы временных рядов.

Представим каждый временной ряд системы в виде (4), при этом на каждом шаге моделирования будем учитывать взаимосвязь временных рядов; таким образом, получим описание динамики их развития во взаимосвязи друг с другом.

На первом этапе моделирования системы для соответствующих рядов выделяется функция тренда $f(t)$, которую обычно приближают полиномом достаточно низкой степени, также могут быть использованы и различные нелинейные по оцениваемым параметрам выражения. Между переменными y и t нет строгой функциональной зависимости, поэтому полученная модель для одного ряда может быть представлена в виде:

$$y^i(t) = f^i(t) + \varepsilon_trend^i(t), \quad (5)$$

где $y^i(t)$ – фактические значения i -го ряда; $f^i(t)$ – функция трендовой составляющей для i -го ряда, $\varepsilon_trend^i(t)$ – случайная величина, характеризующая отклонения реального значения ряда от теоретического, найденного по уравнению регрессии.

Далее из каждого ряда системы выделяются остатки $\varepsilon_trend^i(t)$:

$$\varepsilon_trend^i(t) = y^i(t) - f^i(t). \quad (6)$$

Дальнейшее сглаживание временных рядов производится методами гармонического анализа, основанного на использовании формул Фурье. Для каждого временного ряда системы находятся значимые гармоники. Затем последовательно ищутся совместные амплитуды и фазы только для тех временных рядов, у которых на данном периоде T_k имеются значимые гармоники.

Совместную гармоническую составляющую можно представить в виде:

$$g^i(t) = \sum_{k=1}^m A_k \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T_k} + \varphi_k\right), \quad (7)$$

где $t = 1, 2, \dots, n$, m - количество значимых гармоник, $A_k := \frac{\sum_{j=1}^p A_j}{p}$ - совместная амплитуда, $\varphi_k = \sum_{j=1}^p \varphi_{jm} - \varphi_{jk}$ - совместная фаза, $T_k = \frac{n}{k}$ - совместный период, p - количество повторений периода для N временных рядов, $k = 1, 2, \dots, m$.

Далее находятся остатки для каждого временного ряда:

$$\varepsilon_{-} g^i(t) = \varepsilon_{-} trend^i(t) - g^i(t).$$

После выделения регулярных составляющих целью анализа системы временных рядов является моделирование остатков $\varepsilon_{-} g^i(t)$ случайной с элементами регулярности функцией $\psi(t)$.

Функция $\psi(t)$ для системы взаимосвязанных временных рядов может быть представлена в виде модели векторной авторегрессии.

Рассматривая векторную авторегрессию, имеем N рядов, и у каждого из них значение в момент t связано не только с его собственными значениями в предыдущие моменты времени, но и с предшествующими значениями других рядов. Для построения модели используются только те ряды, для которых корреляция значима.

Пусть $y^i(t)$ $i=1..N$ - i -й временной ряд. Модель векторной авторегрессии порядка p для i -го временного ряда будет иметь вид:

$$y^i(t) = a_0^i + \sum_{j=1}^N a_{1j}^i y^j(t-1) + \sum_{j=1}^N a_{2j}^i y^j(t-2) + \dots + \sum_{j=1}^N a_{pj}^i y^j(t-p) + \varepsilon^i(t). \quad (8)$$

Коэффициенты уравнений модели находятся методом наименьших квадратов. Далее из каждого ряда системы выделяются остатки:

$$\begin{aligned} \varepsilon^i(t) = & \varepsilon_{-} g^i(t) - (a_0^i + \sum_{j=1}^N a_{1j}^i y^j(t-1) + \sum_{j=1}^N a_{2j}^i y^j(t-2) + \dots + \\ & + \sum_{j=1}^N a_{pj}^i y^j(t-p) + \sum_{j=1}^p \beta^i \varepsilon_{-} g^i(t-j)) \end{aligned} \quad (9)$$

В итоге получаем для каждого из N временных рядов комплексную модель следующего вида:

$$\begin{aligned}
y^i(t) = & f^i(t) + g^i(t) + a_0^i + \sum_{j=1}^N a_{1j}^i y^j(t-1) + \sum_{j=1}^N a_{2j}^i y^j(t-2) + \dots + \\
& + \sum_{j=1}^N a_{pj}^i y^j(t-p) + \sum_{j=1}^p \beta^j \varepsilon_{-} g^i(t-j) + \varepsilon^i(t)
\end{aligned} \tag{10}$$

На каждом этапе моделирования очередная компонента модели временного ряда ищется по критерию минимума внешнего среднеквадратического отклонения (3), проводится проверка соблюдения предположений регрессионного анализа и при несоблюдении предположений выполняются соответствующие процедуры адаптации.

Комплексная модель системы временных рядов, как и любая модель временного ряда, подвержена «старению»: информация о состоянии объекта непрерывно обновляется, и модель с коэффициентами на основе первоначальных данных может не соответствовать новым поступающим данным. По мере поступления новых данных параметры модели необходимо корректировать, адаптируя модель к новым условиям развития процесса, таким образом, прогноз становится более точным. «Старение» модели преодолевается корректировкой параметров.

Учитывая требования простоты, быстрой сходимости и работоспособности при значительных вариациях реальной ситуации и априорной неопределенности перспективным является использование адаптивных псевдоградиентных алгоритмов, обладающих высоким быстродействием и позволяющих оценивать параметры моделей систем временных рядов в условиях их неполного описания. Сформированные этими алгоритмами оценки сходятся к оптимальным при довольно слабых условиях.

Рассмотрим алгоритм обновления параметров модели системы временных рядов, как псевдоградиентную процедуру. После структурно-параметрической идентификации системы при поступлении новых данных параметры построенной модели корректируются с помощью псевдоградиента, что дает возможность получать прогнозы с повышенной точностью.

Суть данного метода заключается в минимизации функции

$$J(\bar{\alpha}_n) = M[\mathfrak{Z}(\bar{\alpha}_n)] = M[(f(z_n, \bar{\alpha}_n) - z_n)^2], \tag{11}$$

(где z_n – наблюдения; $f(z_n, \bar{\alpha}_n)$ - некоторая функция), но при этом вместо градиента функции (11) берётся градиент реализаций $\mathfrak{Z}(\bar{\alpha}_n) = (f(z_n, \bar{\alpha}_n) - z_n)^2$, то есть $\nabla \mathfrak{Z}(\bar{\alpha}_n) = 2 \frac{df(z_n, \bar{\alpha}_n)}{d\bar{\alpha}_n}$, который и будет псевдоградиентом для функции $J(\bar{\alpha}_n)$.

В качестве $f(z_n, \bar{\alpha}_n)$ будут выступать поочередно функции $f^i(t)$, $g^i(t)$, $\psi^i(t)$, используемые в модели (10). Тогда параметры модели находятся по формуле:

$$\bar{\alpha}_{n+1} = \bar{\alpha}_n - \lambda_n \nabla \mathfrak{Z}(\bar{\alpha}_n), \quad (12)$$

где $\bar{\alpha}_{n+1}$ – следующее за $\bar{\alpha}_n$ приближение вектора параметров модели, λ_n – положительное число (шаг), $\nabla \mathfrak{Z}(\bar{\alpha}_n)$ – псевдоградиент функции $J(\bar{\alpha}_n)$. Это уравнение показывает, что корректировка коэффициентов производится путем добавления к старому вектору параметров поправки, получаемой умножением коэффициента λ_n на псевдоградиент.

Каждый шаг в (12) делается в направлении скорейшего убывания $\mathfrak{Z}(\bar{\alpha}_n)$.

Адаптация может выполняться непосредственно в процессе обработки, поэтому не требуется линий задержки данных. Кроме того, становится возможной обработка неоднородных данных, так как процедура (12) постоянно «подстраивает» параметры модели.

В третьей главе рассмотрено разработанное программное обеспечение, которое встраивается в систему управления объектом: на основе получаемых прогнозов принимается решение по изменению условий работы технического объекта. Программный комплекс на базе методики структурно-параметрической идентификации системы временных рядов позволяет в автоматическом режиме при непрерывном поступлении данных получать оптимальные модели системы взаимосвязанных временных рядов с последующим их использованием для прогнозирования состояния исследуемого процесса. В случае выхода контролируемых параметров за «коридор» допустимых значений выводится сообщения о нарушениях процесса и подается соответствующий сигнал о необходимости принятия решения. На рис. 2. представлена структура разработанного программного комплекса.

В качестве *примера численного исследования* для практического применения разработанных моделей и алгоритмов рассмотрена система управления гидроагрегатом, показанная на рис. 1. Предлагаемый программный комплекс интегрируется со стойкой виброконтроля и в зависимости от результатов прогноза через стойку управления гидроагрегатом изменяется нагрузка или происходит останов агрегата.

Массив данных представляет собой значения параметров вибраций гидроагрегата, измеренных через равные интервалы времени (полсекунды) в двух режимах работы: в режиме запуска и при работе в сети. Данные по вибрациям поступали по восьми каналам, причём по первым двум поступали результаты измерений абсолютной вибрации, по остальным передавалась информация по относительной вибрации элементов гидроагрегата. Например, наблюдения в режиме работы агрегата в сети длились 1200 секунд, показания снимались два



Рис. 2. Структура программного комплекса

раза в секунду, всего получено 2400 наблюдений по каждому из восьми каналов.

Ниже представлены результаты анализа, моделирования и прогнозирования временных рядов вибраций гидроагрегата для режима запуска с применением *описания системы временных рядов адаптивными регрессиями*. Для каждого временного ряда $y^1(t), y^2(t), \dots, y^8(t)$ были построены модели в соответствии с формулой (4). Например, модель для первого ряда имеет вид:

$$\begin{aligned}
 y^1(t) = & -154,185 + 26,267 \cdot t - 0,246 \cdot t^2 + 10,612 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{12}t + 87,183\right) + \\
 & + 54,589 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{38}t + 135,56\right) + 0,837 \cdot \varepsilon_g^1(t-1) - 0,091 \varepsilon^1(t-1) + \varepsilon^1(t).
 \end{aligned}$$

Методом полного перебора по критерию минимума внешнего среднеквадратического отклонения были получены статистические модели в виде адаптивных регрессий по каждому параметру, зависящему от остальных измеряемых характеристик. Например, для первого параметра:

$$y^1 = 121,198 + 0,626y^2 - 3,509y^3 - 0,288y^4 + 3,176y^5 - 0,111y^6 + 0,029y^7 - 0,160y^8.$$

По полученным моделям построен прогноз показаний вибраций для восьми каналов. На рис. 3 представлены графики предсказанных (штриховая линия) и исходных (сплошная линия) значений временных рядов.

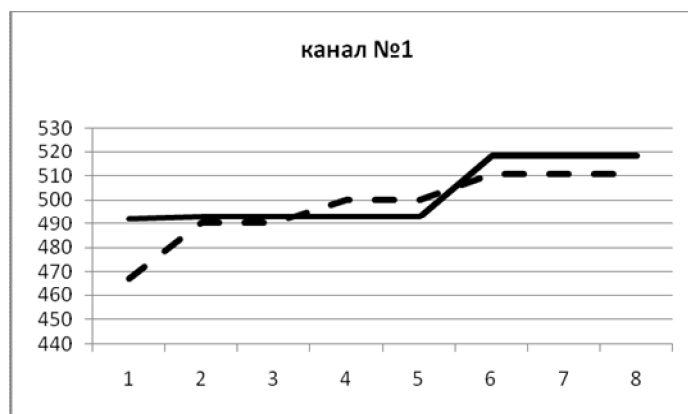


Рис. 3. Графики наблюдений (сплошная линия) и предсказанных значений вибраций гидроагрегата (штриховая линия) по первому каналу

Аналогично, для режима работы гидроагрегата в сети методом полного перебора по критерию минимума ошибки прогнозирования получены соответствующие адаптивные регрессии и выполнен прогноз.

Для сравнительного анализа эффективности разработанной методики использовался стандартный подход построения моделей авторегрессии – проинтегрированного скользящего среднего, реализованный в пакете Statistica. В таблице 1 представлены результаты сравнения по точности прогнозирования (внешнее среднеквадратическое отклонение) для всех временных рядов, полученных по восьми каналам измерения вибраций.

Таблица 1. Результаты сравнительного анализа

Модель	Режим	№ канала							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Авторегрессия-проинтегрированное скользящее среднее	запуск	40,46	45,40	6,53	76,09	5,79	91,96	7,58	12,57
	работа в сети	4,99	3,32	2,68	15,91	8,21	878,55	6,01	2,72
Адаптивные регрессии	запуск	20,42	26,54	1,49	36,84	2,41	77,28	5,50	2,39
	работа в сети	4,90	2,71	2,29	13,95	6,43	679,93	4,09	2,30

Результаты численных экспериментов свидетельствуют об эффективности использования описания системы временных рядов адаптивными регрессиями при прогнозировании временных рядов вибраций гидроагрегата: точность прогнозирования возрастает от 1,5 до 5,2 раз по сравнению с точностью при использовании модели авторегрессии – проинтегрированного скользящего среднего. Таким образом, на примере характеристик гидроагрегата показано, что

совместное описание временных рядов на основе адаптивных регрессий позволяет повысить точность прогнозирования, что дает возможность принимать с определённым запасом времени решения, направленные на предупреждение опасной ситуации.

Далее представлены результаты анализа, моделирования и прогнозирования временных рядов вибраций гидроагрегата с применением *структурно-параметрической идентификации системы временных рядов* (рис. 4).

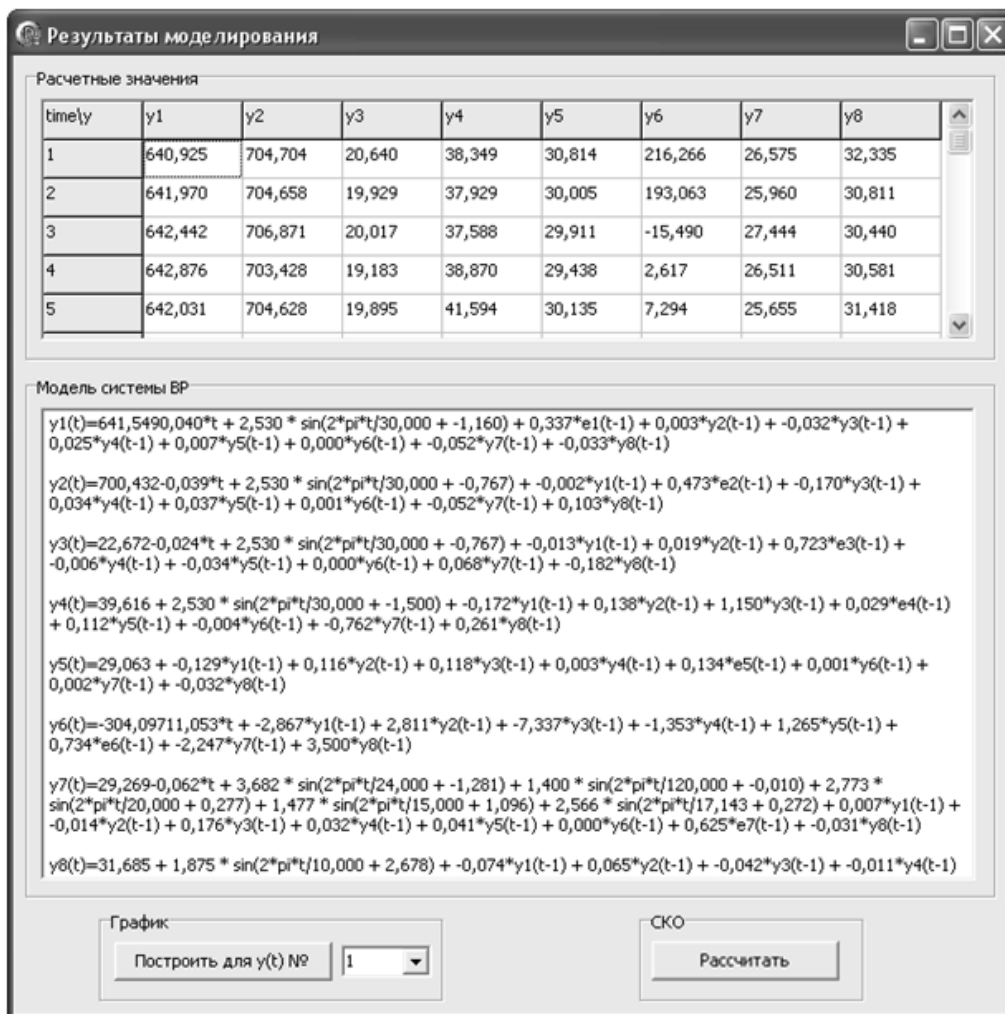


Рис.4. Результаты моделирования состояния гидроагрегата (по вибрациям) при работе в сети

Для временных рядов $y^1(t), y^2(t), y^3(t), y^5(t), y^6(t), y^8(t)$ выделена трендовая составляющая, оптимальная по критерию минимума внешнего среднеквадратичного отклонения σ_{Δ} . На следующем этапе проводится спектральный анализ остатков с целью выявления значимых совместных гармоник для системы временных рядов. Методом пошаговой регрессии найдены значимые гармоники. Затем последовательно найдены совместные амплитуды и фазы только для тех временных рядов, у которых на данном периоде имеются значимые гармоники. После выделения регулярных составляющих и выявления взаимозависимых временных рядов остатки $\varepsilon_g^i(t)$ сглаживались моделью векторной авторегрес-

сии. В итоге получена для каждого из N временных рядов комплексная модель, показанная на рис. 4.

Для сравнительного анализа эффективности разработанной методики использовался, как и ранее, стандартный подход построения моделей авторегрессии – проинтегрированного скользящего среднего. В таблице 2 представлена сравнительная оценка точности аппроксимации и прогнозирования при использовании этих методов: точность моделирования и прогнозирования возрастает от 1,5 до 4,7 раз по сравнению с точностью при использовании модели авторегрессии – проинтегрированного скользящего среднего.

Таблица 2. Сравнительная оценка точности моделирования и прогнозирования для системы временных рядов

№ канала	Модель авторегрессии – проинтегрированного скользящего среднего				Структурно-параметрическая идентификация системы временных рядов			
	σ		σ_{Δ}		σ		σ_{Δ}	
	запуск	работа в сети	запуск	работа в сети	запуск	работа в сети	запуск	работа в сети
1	17,46	15,38	20,73	11,94	13,10	3,31	15,35	3,10
2	28,26	4,48	24,95	8,03	17,84	3,24	16,94	4,78
3	2,47	2,79	3,34	2,93	1,11	1,87	2,44	1,34
4	78,62	17,1	76,99	11,39	36,92	17,02	45,18	7,14
5	6,23	4,81	7,60	7,29	2,11	4,71	7,53	5,03
6	87,35	129,36	94,09	712,45	39,45	128,45	46,35	654,6
7	73,58	4,89	78,78	6,42	72,20	3,62	73,49	6,36
8	5,86	4,04	14,16	2,71	3,29	4,13	5,11	2,53

Рассмотрен вопрос об обновлении коэффициентов модели при обработке системы временных рядов в режиме запуска. По полученным комплексным моделям был сделан прогноз на 15 значений вперед. Затем параметры моделей были обновлены с помощью псевдоградиента с использованием данных по семи новым наблюдениям. По полученным моделям был построен прогноз на восемь значений. На рис. 5 представлены результаты прогнозирования системы временных рядов без обновления коэффициентов и с обновлением: исходные данные (тонкая линия), спрогнозированные и обновленные данные с помощью псевдоградиента (жирная линия), спрогнозированные данные без обновления (пунктирная линия).

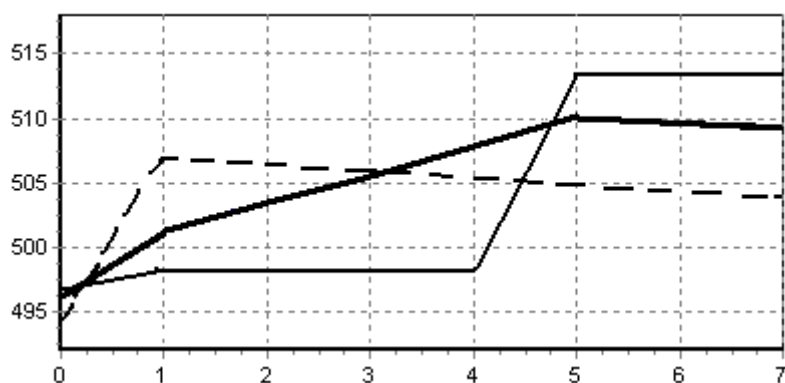


Рис. 5. График прогноза с обновлением и без обновления при контроле вибраций по первому каналу

Сравнительная оценка свидетельствует о повышении точности прогнозирования до 1,5 раз при обновлении коэффициентов модели с помощью псевдоградиента по всем восьми каналам.

Таким образом, применение разработанных алгоритмов существенно повышает точность прогнозирования системы временных рядов, что может быть использовано для улучшения прогнозирования состояния технического объекта в системе управления. Рассмотрим теперь, как точность прогноза влияет на эффективность системы управления на примере управления гидроагрегатом.

Эффективность системы управления оценивалась по коэффициенту готовности. При внедрении разработанного программного комплекса готовность системы повышается как по сравнению с использованием пакета Statistica, так и по сравнению с реагированием на аварийные ситуации без системы предупреждения: среднее суммарное время вынужденного простоя сокращается в два раза по сравнению с использованием пакета Statistica и в три раза по сравнению с реагированием на аварийные ситуации без системы предупреждения. При среднем времени между двумя авариями, равном трем месяцам (90 дней), среднее суммарное время вынужденного простоя при использовании разработанного программного комплекса составит 0,615 дня (коэффициент готовности $K_r = 0,993$), при использовании пакета Statistica - 0,963 дня ($K_r = 0,989$), в случае реагирования на критические ситуации без системы предупреждения – два дня ($K_r = 0,977$).

На рис. 6 приведены графики зависимости коэффициента готовности от среднего времени на одну «ложную тревогу» (τ_f , дней) и от относительной частоты «ложной тревоги» ($P_f = 1/\tau_f$) при прогнозировании аварийных ситуаций с использованием разработанного программного комплекса (жирная линия), пакета Statistica (тонкая линия) и реагировании на аварийные ситуации без системы предупреждения (пунктирная линия).

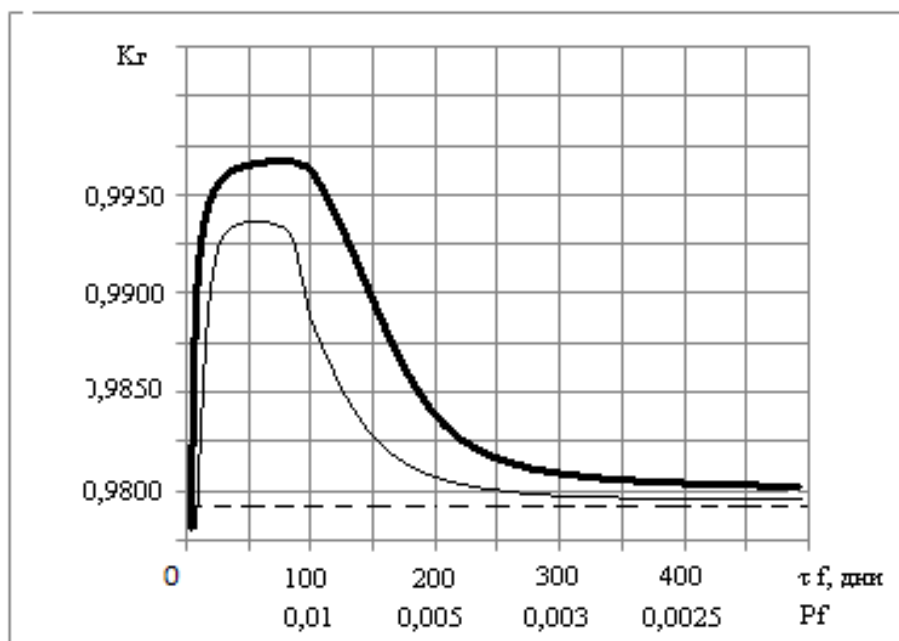


Рис. 6. Зависимость коэффициента готовности (K_g) от среднего времени на одну «ложную тревогу» (τ_f , дней) и от относительной частоты «ложной тревоги» ($P_f=1/\tau_f$).

Оказалось, что при $\tau_f=84$ дня ($P_f=0,0119$) достигается наибольшее значение коэффициента готовности ($K_g=0,997$) при использовании разработанного программного комплекса, среднее суммарное время вынужденного простоя при этом составит 0,269 дня. Аналогичные расчеты для пакета Statistica показали, что при $\tau_f=61$ день ($P_f=0,0164$) достигается наибольшее значение $K_g=0,994$, среднее суммарное время вынужденного простоя при этом 0,555 дней. Возможна постановка задачи об оптимизации управления агрегатом по коэффициенту готовности, когда параметры системы управления выбираются так, чтобы коэффициент готовности был максимальным.

Таким образом, использование разработанных моделей многомерных процессов повышает эффективность системы управления гидроагрегатом не только за счёт более точного прогнозирования, но и за счёт повышения коэффициента готовности и снижения времени вынужденного простоя.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

1. В результате анализа существующих методов контроля в системах управления техническими объектами сформулирована задача разработки алгоритмов прогнозирования систем временных рядов для раннего предупреждения об аварийной ситуации на объекте.

2. Предложены алгоритмы обработки информации о состоянии объекта управления путем прогнозирования систем временных рядов на основе адаптивного динамического регрессионного моделирования: описание системы временных рядов адаптивными регрессиями и структурно – параметрическая идентификация системы. С целью получения более достоверной информации о состоянии технического объекта разработаны процедуры, обеспечивающие ди-

намическую настройку коэффициентов полученной модели, путем ее обновления на основе псевдоградиентного алгоритма.

3. На основе предложенных алгоритмов разработан программный комплекс, который в составе системы управления обеспечивает автоматизацию прогнозирования состояния технического объекта для предупреждения выхода значений параметров за «коридор» допустимых значений.

4. Точность прогнозирования при применении разработанных методов и программного обеспечения при обработке данных по вибрациям гидроагрегата повышается в 1,5 - 5 раз. При этом время, необходимое для построения прогноза по разработанным моделям не увеличивается по сравнению с существующими методами, что является важным, так как не препятствует осуществлению обработки данных в режиме реального времени и позволяет своевременно принять управленческое решение.

5. Показано повышение эффективности системы управления гидроагрегатом: использование разработанного программного комплекса приводит к сокращению среднего суммарного времени вынужденного простоя, связанного с реагированием на аварийные ситуации, в 2 - 3 раза, при этом повышается и коэффициент готовности.

Основные положения диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

В изданиях из перечня ВАК:

1. Алёшина, А. А. Использование псевдоградиента при выборе параметров модели вибраций гидроагрегата / А. А. Алёшина // Системы управления и информационные технологии. 2013. – № 1.1 (51). – С. 113–117.
2. Клячкин, В. Н. О возможности совместного описания характеристик гидроагрегата адаптивными регрессиями / В. Н. Клячкин, Ю. Е. Кувайскова, А. А. Алёшина // Вектор науки ТГУ, 2013. – № 1 (23). – С. 40 – 41.
3. Клячкин, В. Н. Информационно-математическая система раннего предупреждения об аварийной ситуации / В. Н. Клячкин, Ю. Е. Кувайскова, А. А. Алёшина, Ю. А. Кравцов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2013. - №4(4). – С. 919 – 923.

В других изданиях:

4. Афанасьева, Т. В. Применение интеллектуальных методов при прогнозировании временных рядов / Т. В. Афанасьева, А. А. Ивахина (А. А. Алёшина) // Математическое моделирование в образовании, науке и производстве: тезисы VI Международной конф. (Тирасполь, 7–10 июня 2009 г.). – Тирасполь, Изд-во Приднестр. ун-та, 2009 г. – С. 5–6.
5. Алёшина, А. А. Исследование сценариев анализа данных для систем временных рядов параметров летательных аппаратов / А. А. Алёшина // Информатика и вычислительная техника: сборник научных трудов 3-й Российской науч-

но-технической конф. аспирантов, студентов и молодых ученых. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – С. 23–28.

6. Валеев, С. Г. О возможности совместного описания полетных характеристик адаптивными регрессиями / С. Г. Валеев, А. А. Алёшина // Математические методы и модели: теория, приложения и роль в образовании: сборник научных трудов. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – С. 54–68.

7. Алёшина, А. А. Модели временных рядов характеристик гидроагрегатов / А. А. Алёшина // Вузовская наука в современных условиях: сборник материалов 46-й научно-технической конф. – Ульяновск : УлГТУ, 2012. – В 3 ч. Ч. 2. – С. 219–222.

8. Алёшина, А. А. Моделирование временных рядов на основе адаптивных динамических регрессий / А. А. Алёшина // Информатика и вычислительная техника: сборник научных трудов 4-й Всероссийской научно-технической конф. аспирантов, студентов и молодых ученых. – Ульяновск : УлГТУ, 2012. – Т. 1. – С. 36–41.

9. Алёшина, А. А. Применение адаптивного регрессионного моделирования к системе временных рядов / А. А. Алёшина // Информатика, моделирование, автоматизация проектирования: сборник научных трудов IV Всероссийской школы–семинара аспирантов, студентов и молодых ученых. – Ульяновск : УлГТУ, 2012. – С. 74–78.

10. Кувайскова, Ю. Е. Информационно – математические технологии для совместной обработки системы временных рядов / Ю. Е. Кувайскова, А. А. Алёшина // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: сборник научных трудов 8-й Всерос. научно – практической конф. – Ульяновск : УлГТУ, 2013. – С. 197–199.

11. Алёшина, А. А. Совместное регрессионное моделирование вибраций гидроагрегата / А. А. Алёшина // Информационные технологии моделирования и управления. – Воронеж : Научная книга, 2013. – № 3 (81). – С. 248–256.

12. Кувайскова, Ю.Е. Программный комплекс моделирования и прогнозирования системы временных рядов / Ю. Е. Кувайскова, А. А. Алёшина // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – Ульяновск : УлГТУ, 2013. – №. 2. – С. 24–27.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

13. Клячкин, В. Н. Информационно-математическая система раннего предупреждения об аварийной ситуации / В. Н. Клячкин, Ю. Е. Кувайскова, А. А. Алёшина // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013618720.

14. Алёшина, А. А. Псевдоградиентный метод оценивания параметров системы временных рядов / А. А. Алёшина // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013618719.

Алёшина Анна Александровна

Разработка алгоритмов и программ
для системы управления техническими объектами на основе
адаптивного динамического регрессионного моделирования

Автореферат

Подписано в печать 18.11.2013. Формат 60x84/16.

Бумага писчая. Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,00.

Тираж 110 экз. Заказ _____

Типография УЛГТУ, 432027, г. Ульяновск, Северный Венец, 32.