

На правах рукописи

Петров Олег Николаевич

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ФОРМАЛИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЗЫ
ЗНАНИЙ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА АДАПТИВНОГО РЕЗОНАНСА**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2008

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном морском техническом университете (СПбГМТУ)

Научный руководитель – Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор Нечаев Ю.И.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
доктор технических наук, доцент

Геппенер В.В.
Сиек Ю.Л.

Ведущая организация – Санкт-Петербургский Государственный университет

Защита состоится «_26_» _ноября_____2008 г. в _15:00__ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.01 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан «_24_» __октября_____ 2008 г.

Ученый секретарь совета

Пантелеев М.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Разработка методов и моделей формализации динамической базы знаний, обеспечивающей функционирование бортовой интеллектуальной системы (ИС) безопасности эксплуатации судов в нестандартных, особенно в нештатных и экстремальных ситуациях, является актуальной проблемой при оценке и прогнозе динамики судна на волнении. Повышение надежности и качества принимаемых решений в бортовых ИС достигается на основе динамической базы знаний и высокопроизводительных средств обработки измерительной информации в мультипроцессорной вычислительной среде. Для реализации алгоритмов обработки информации при контроле режима функционирования ИС на основе динамической базы знаний, необходимо:

- разработать механизмы преобразования информации при построении динамической базы знаний, обеспечивающей решение задач анализа и интерпретации данных измерений в режиме реального времени;
- выделить структуры, методы и модели, описывающие поведение судна в нестандартных ситуациях;
- разработать адаптивные алгоритмы контроля динамики судна в нестандартных ситуациях и установить закономерности между особенностями исследуемых процессов и поведением судна при различной интенсивности внешних возмущений.

Анализ и интерпретация измерительной информации в бортовых ИС представляют собой одно из важных направлений формирования программной среды для реализации механизма логического вывода при контроле поведения судна в различных условиях эксплуатации. Методы и модели, обеспечивающие функционирование динамической базы знаний, позволяют исследовать динамические процессы в условиях неопределенности и неполноты исходной информации. При построении алгоритмов и программного обеспечения основное внимание уделяется использованию адаптивных моделей анализа и интерпретации информации в режиме реального времени.

В диссертации рассматривается подход и вычислительная технология, обеспечивающие анализ динамики взаимодействия судна с внешней средой в бортовой ИС обеспечения мореходных качеств судов. Основное внимание уделяется вопросам контроля поведения судна в нештатных и экстремальных ситуациях на базе эффективного математического аппарата, разработанного на основе принципа адаптивного резонанса. Этот принцип позволяет «настраивать» логическую систему знаний на восприятие сложной информации о поведении судна в рассматриваемой ситуации. Модели обработки информации основаны на конкурирующих вычислительных технологиях, использующих традиционные методы, нечеткую логику и искусственные нейронные сети (ИНС).

Таким образом, актуальность темы диссертации обусловлена:

- авариями судов в нештатных и экстремальных ситуациях, в том числе и аварией крупного контейнеровоза (США) при интенсивной качке в режиме параметрического резонанса;

- отсутствием методов контроля динамики судна в нештатных и экстремальных ситуациях;
- совершенствованием информационных технологий построения моделей знаний в нештатных и экстремальных ситуациях.

Целью работы является разработка и исследование модели динамической базы знаний, обеспечивающей обработку данных измерений динамики взаимодействия судна с внешней средой в нестандартных ситуациях при неопределенности и неполноте исходной информации. Для достижения этих целей в диссертации решались следующие основные **задачи**:

1. Разработка и обоснование модели динамической базы знаний на основе принципа адаптивного резонанса.
2. Разработка алгоритмов и программного комплекса функционирования динамической базы знаний при обработке информации в нестандартных ситуациях.
3. Моделирование взаимодействия судна с внешней средой в нестандартных ситуациях при различном уровне внешних возмущений.
4. Генерация сценариев взаимодействия, анализ альтернатив и выбор предпочтительной вычислительной технологии обработки информации в нестандартных ситуациях.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе были использованы системный анализ, методы математического моделирования, методы вычислительной математики, теория вероятностей и математической статистики, теория графов, теория матриц, теория нечетких систем и нейронных сетей, а также методы искусственного интеллекта и прикладного программирования.

Объект исследования. Объектом исследования являются нестандартные (нештатные и экстремальные) ситуации, возникающие при оценке мореходных качеств в процессе эксплуатации транспортных и промысловых судов.

Научную новизну работы составляет:

1. Модель динамической базы знаний, разработанная на основе принципа адаптивного резонанса.
2. Методы и алгоритмы обработки измерительной информации в нештатных и экстремальных ситуациях на основе конкурирующих вычислительных технологий.
3. Результаты математического моделирования динамики судна в сложных ситуациях.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработана адаптивная модель динамической базы знаний и алгоритмы анализа измерительной информации при оценке поведения судна в сложных ситуациях.
2. Разработан программный комплекс, обеспечивающий решение задач анализа и интерпретации информации в сложных ситуациях, определяющей функционирование ИС контроля мореходных качеств судна.

Практическая значимость диссертационного исследования обеспечена прикладной направленностью и созданием конкретных методов, алгоритмов и программных средств в системах интеллектуальной поддержки оператора бортовой ИС контроля динамики судна в сложных ситуациях.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Нечеткая модель обработки измерительной информации при контроле режима функционирования и анализе сложных ситуаций в бортовых ИС.
2. Модель динамической базы знаний, функционирующая на основе принципа адаптивного резонанса.
3. Результаты математического моделирования сложных ситуаций в бортовых ИС реального времени.
4. Программный комплекс анализа и интерпретации нестандартных ситуаций при контроле динамики судна на волнении.

Достоверность научных результатов и выводов подтверждаются строгостью доказательства утверждений и наложенных ограничений, обоснованностью применения математического аппарата, оценкой адекватности математических моделей, результатами тестирования алгоритмов и программного обеспечения, а также практическим использованием разработанных математических, алгоритмических и программных методов и средств.

Внедрение результатов работы. Разработанные методы, алгоритмы и программные средства внедрены в ФГУП «Адмиралтейские верфи» при разработке новых типов судов активного ледового плавания и используются в учебном процессе СПбГМТУ при проведении лабораторных и курсовых работ по курсу «Инженерия знаний» в рамках магистерской подготовки студентов специальности 220400 «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем».

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на национальных и международных научно-технических конференциях:

1. Международная конференция МОРИНТЕХ'2005, Санкт-Петербург, 2005;
2. Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2005, Санкт-Петербург, 2005;
3. Научно-методическая конференция «Телематика-2005»;
4. Национальная конференция «Управление и информационные технологии» УИТ-2006, Санкт-Петербург, 2006;
5. Международная конференция МОРИНТЕХ'2006, Санкт-Петербург, 2006;
6. Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2006, Санкт-Петербург, 2006;
7. Научно-методическая конференция «Телематика-2006»;
8. Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2007, Санкт-Петербург, 2007;
9. Научно-методическая конференция «Телематика-2007»;
10. Международная конференция по искусственному интеллекту ИИ-2008, Крым, Кацивели, 2008;
11. Международная конференция МОРИНТЕХ'2008, Санкт-Петербург, 2008;

12. Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2008, Санкт-Петербург, 2008;

13. Научно-методическая конференция «Телематика-2008»;

14. International conference Poland, 2005;

15. International work-shop Gamburg, Germany, 2007.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 работ, из них – 4 статьи (3 статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК), а также 16 работ и докладов в трудах международных и всероссийских конференциях.

Объем и структура работы.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 204 наименования, и двух приложений. Основная часть работы изложена на 137 страницах машинописного текста. Работа содержит 61 рисунок, 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации.

Первая глава содержит анализ проблемы создания динамической базы знаний и формулировку теоретических принципов и вычислительных технологий, обеспечивающих реализацию адаптивных моделей в бортовых интеллектуальных системах (ИС), аналитический обзор состояния вопроса, особенности задач анализа и прогноза развития сложных ситуаций, а также формулировку целей и задач исследования.

Вторая глава посвящена разработке концептуальной модели построения динамической базы знаний на основе принципа адаптивного резонанса и нечетких моделей контроля режима функционирования ИС в соответствии с положениями 1 и 2, выносимыми на защиту. Основное внимание здесь уделяется формулировке общих принципов построения динамической базы знаний и теоретическим аспектам реализации этой структуры на основе принципа адаптивного резонанса. На основе концептуальной модели разработана архитектура системы и ее функциональные модули, модели контроля режима функционирования ИС и модель интерфейса оператора ИС при анализе и прогнозе нештатных и экстремальных ситуаций.

Формирование концептуальной модели функционирования динамической базы знаний предусматривает генерацию альтернативных концепций, анализ вариантов и выбор предпочтительной технологии. Разработаны процедуры формирования различных подходов к выбору предпочтительного варианта решения из множества альтернатив. Анализ показал, что наиболее предпочтительным вариантом является использование логической системы знаний на основе принципа адаптивного резонанса.

Анализ систем, основанных на знаниях, позволяет представить формальную модель информационной среды $M(S)$ анализа нештатных и экстремальных ситуаций при функционировании бортовой ИС в виде обобщенной структуры:

$$M(S) = \langle F(S), S(t), B(AR), D(Q,W,V), U(PC) \rangle, \quad (1)$$

где $F(S)$ – функциональные компоненты; $S(t)$ – исследуемые ситуации; $B(AR)$ – динамическая база знаний, построенная на основе принципа адаптивного резонанса; $D(Q,W,V)$ – обобщенная база данных; $U(PC)$ – управляющий программный комплекс.

Функциональными компонентами $F(S)$ являются исполняемые модули прикладных систем и служебные модули, обеспечивающие совместную работу объединяемых систем. Эти модули взаимодействуют с динамической базой знаний $B(AR)$ и обобщенной базой данных $D(Q,W,V)$. Управляющий программный комплекс $U(PC)$ обеспечивает функционирование системы $M(S)$.

Обобщенная база данных $D(Q,W,V)$ формируется в соответствии с общими принципами построения баз данных бортовых ИС и содержит данные о судне Q , характеристиках волнения W и ветра V . Структура управления программными системами представлена на основе сетевых моделей упорядочения событий в соответствии с логикой системы и потоком информации в текущей ситуации. Информационная среда анализа и интерпретации нестандартных ситуаций обеспечивает интеллектуальную поддержку оператора ИС (рис.1).



Рис.1. Информационная среда анализа и интерпретации нестандартных ситуаций

При формализации знаний и механизма логического вывода важное значение имеет организация адаптивной компоненты на основе принципов обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде. Одно из направлений ее организации связано с реализацией принципа адаптивного резонанса (Adaptive Resonance Theory – ART), получившего широкое распространение при построении и обучении нейронных сетей. Формируемые на основе этого принципа свойства базы знаний наиболее четко проявляются при обеспечении функционирования ИС в задачах интерпретации экстремальных ситуаций в условиях неопределенности и неполноты исходной информации.

Особенностью системы знаний, использующей принципы адаптивного резонанса, являются:

- возможность сохранения *свойства пластичности* при запоминании новой информации в процессе функционирования ИС;
- предотвращение модификации исходной базы знаний за счет формирования новых правил, описывающих возникшую нестандартную ситуацию.

При функционировании ИС происходит накопление новой информации и корректировка базы знаний. Динамическая база знаний совершенствуется и расширяется за счет включения новых моделей. Подобно нейронной сети ART, база знаний имеет внутренний детектор новизны – тест на сравнение предъявленной нестандартной ситуации (нового образа) с содержимым ансамбля логических правил. При реализации механизма логического вывода новый образ, предъявленный на основе поступившей информации, классифицируется с одновременной уточняющей модификацией процедур, определяющих условную часть логического правила. Такую ситуацию можно интерпретировать как возникновение адаптивного резонанса в динамической базе знаний в ответ на предъявление образа. Если резонанс не возникает в пределах некоторого заданного порогового уровня, то успешным считается тест новизны, и образ (нестандартная ситуация) воспринимается как новый.

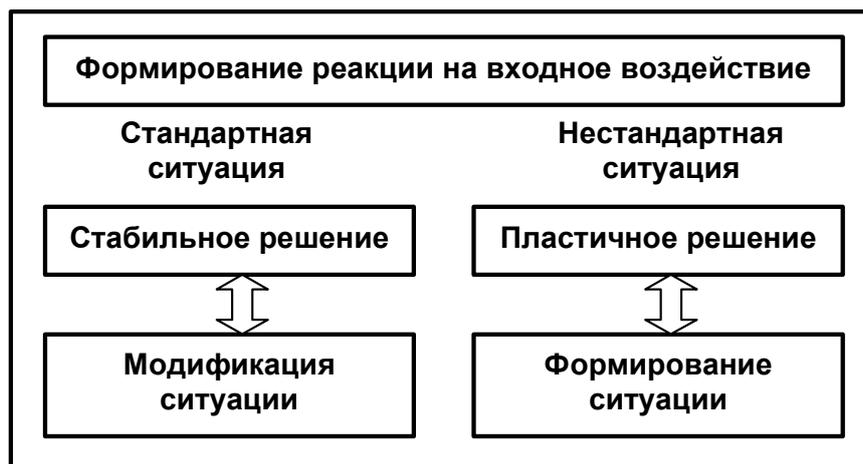


Рис.2. Адаптивная компонента.

Модификация логических правил, не испытавших резонанса, при этом не производится. Запомненный образ нестандартной ситуации не будет изменяться, если текущая входная информация не окажется достаточно похожим на него. Таким образом, решается проблема стабильности-пластичности. Новый образ, описывающий нестандартную ситуацию, может породить создание новых классов таких ситуаций, однако при этом существующая база знаний не разрушается.

Важной особенностью адаптивной компоненты ИС, использующей теорию ART, является реализуемый *шаблон критических черт* информации. Этот шаблон позволяет выделять признаки, предъявленные в некотором образе (нестандартной ситуации), которые являются существенными для системы предварительной обработки информации при реализации механизма логического вывода. Результат распознавания определяется присутствием специфических критических особенностей в нестандартной ситуации.

Задачей адаптивной компоненты является формирование правильной реакции в обоих случаях: «пластичное» решение о появлении нового образа и «стабильное» решение о совпадении со старым образом. При этом выделение критической части информации происходит автоматически в процессе работы ИС в условиях эксплуатации на основе ее «индивидуального опыта».

Другой важной особенностью динамической базы знаний, использующей принцип адаптивного резонанса, является *самоадаптация алгоритма поиска* нестандартных ситуаций. Адаптивная компонента использует управляемый алгоритм поиска, основанный на динамической самоорганизации классов прототипов, соответствующих классам векторов в условной части логического правила, путем наращивания структуры, определяющей «действие» в выходной части логического правила. Если поиск класса, попадающего в «резонанс» с входным вектором по критерию сходства не привел к успеху, то создается ситуация нового класса (добавляется новая нестандартная ситуация). В противном случае согласно обучающему правилу модифицируется прототип того класса, сходство с входным вектором которого максимально.

Контроль режима функционирования ИС при оценке и прогнозе динамики взаимодействия судна с внешней средой осуществляется на основе методов и моделей, позволяющих формализовать допустимость отклонений от режима нормальной эксплуатации и оценить их безопасность.

Рассмотрим стохастическую дискретную систему с r -мерным пространством входов. Выходы системы в момент времени t представляют собой вектор-столбцы $\theta_t, \Psi_t, \dots, \zeta_t$ параметров колебательного движения, определяющих взаимодействия судна с внешней средой в морских условиях. Измерения фиксируются в дискретные моменты времени $1, 2, 3, \dots, t$ и характеризуют траектории параметров, образующих информационный вектор

$$J = \{\theta_t, \Psi_t, \dots, \zeta_t, \dots, t \in [0, T]\}, \quad (2)$$

где T – время наблюдений.

На основе данных о параметрах $\theta_t, \Psi_t, \dots, \zeta_t$ необходимо построить прогнозирующую функцию, наилучшим образом отображающую тенденции в изменении компонент информационного вектора (2). Задавая предельные значения $\theta_t^*, \Psi_t^*, \dots, \zeta_t^*$ характеристик судна исходя из обеспечения требований безопасной посадки, можно установить интервал времени $\tau = \tau_{\min}$, в пределах которого обеспечивается безопасная эксплуатация судна:

$$\tau = \tau_{\min} \text{ при } \theta(t_1) \leq |\theta^*|, \Psi(t_2) \leq |\Psi^*|, \dots, \zeta(t_n) \leq |\zeta^*|. \quad (3)$$

Идентификация математических моделей, определяющих нестандартные (нештатные и экстремальные) ситуации, осуществляется на основе статистического анализа данных измерений, полученных в условиях эксплуатации ИС, а также при имитационном моделировании взаимодействия судна с внешней средой. Временные кривые исследуемых процессов представляются в следующем виде:

$$\mathfrak{R}(t_i) = F(t_i) + \mathfrak{Z}(t_i) + S(t_i). \quad (4)$$

Здесь под $\mathfrak{R}(t_i)$ понимаются исследуемые процессы $\zeta(t_i), \theta(t_i), \Psi(t_i)$; $F(t_i)$ – медленно меняющаяся функция времени (тренд); $\mathfrak{Z}(t_i)$ – периодическая составляющая; $S(t_i)$ – стохастическая составляющая:

$$S(t_i) = \xi(t_i) + \varepsilon(t_i), \quad (5)$$

где $\xi(t_i)$ – независимая случайная последовательность (шум) с математическим ожиданием $M[\xi(t_i)] = 0$ и дисперсией $\sigma_\varepsilon^2(t_i)$; $\varepsilon(t_i)$ – последовательность случайных событий («выбросов»), которые представляют собой аномальные наблюдения в случайные моменты времени τ_i :

$$\varepsilon(t_i) = \begin{cases} A_i, & \text{if } t_i = \tau \\ 0, & \text{if } t_i \neq \tau \end{cases}. \quad (6)$$

где A_i – амплитуда аномального наблюдения, значительно превышающая размах исходного ряда наблюдений. Последовательность аномальных наблюдений образует пуассоновский поток событий с параметром λ .

Построение модели (4) при обработке экспериментальных данных сводится к идентификации аналитического представления слагаемых модели (4). В качестве методов оценивания допустимых отклонений использовались нечеткие методы, заложенные в основу представления базы знаний ИС. При формализации неопределенностей степень соответствия режиму нормальной эксплуатации задается в виде соответствующих нечетких множеств и функций принадлежности (ФП). Используемые статистические оценки позволяют формализовать представление нечеткого множества $A = \{(x, \mu_A(x))\}$, задающего меру соответствия новой интенсивности ранее установленной в процессе эксплуатации ИС, а также нечеткого множества $B = \{(s, \mu_B(s))\}$, определяющего степень соответствия спектральных характеристик новых наблюдений исходным данным.

При наличии скачка амплитуды могут реализовываться две ситуации. Первая – скачок произошел, но опасный порог предельных значений $\zeta^*, \theta^*, \Psi^*$ не достигнут. В этом случае осуществляется переход в режим текущей регистрации и сбора данных для подстройки прогнозирующей модели. Вторая – из-за скачка ситуация приблизилась к значениям $\zeta^*, \theta^*, \Psi^*$. Этот случай представляет наибольший интерес и рассматривается при оценивании опасности ситуации с помощью нечеткого множества $C = \{(z, \mu_C(z))\}$. Выход новой оценки $z = z_0$ за нормируемые пределы трактуется как полное несоответствие прежнему состоянию, что приводит к корректировке модели.

Описанные выше методы нечеткого оценивания соответствия новых данных относятся к контролю отдельных элементов. Контроль осуществляется на основе ФП нового значения параметра диапазону, свойственному прежнему режиму работы системы. Отсутствие соответствия для какого-либо элемента означает невозможность анализа в полном объеме.

Таким образом, новая парадигма обработки информации в динамических средах состоит в рациональной организации вычислительной технологии. Включение в информационный базис нечетких моделей позволило расширить функциональные возможности вычислительной системы и повысить надежность принимаемых решений в нестандартных (нештатных и экстремальных) ситуациях. Разработанные модели и алгоритмы их реализации способны адаптироваться к изменяющимся внешним условиям и распознавать особенности процесса определяющего взаимодействие судна с внешней средой. Такой непрерывный процесс самообучения позволяет ИС накапливать информацию о динамике

взаимодействия и предсказывать отклонения параметров от режимных (допустимых из условия безопасности эксплуатации) значений.

Глава 3 посвящена моделированию, анализу и интерпретации нештатных и экстремальных ситуаций в бортовых ИС (положение 3). В этой главе дается формулировка методов и моделей при интерпретации ситуаций и принятии решений и последовательно рассматриваются и анализируются комплекс задач, связанных с анализом результатов моделирования динамики судна при контроле нештатных и экстремальных ситуаций. Задача принятия решений сформулирована на основе метода анализа иерархий и матрицы риска и состоит в достижении цели при заданных нечетких ограничениях.

В качестве приложения изложенных теоретических принципов моделирования нестандартных динамических ситуаций рассмотрен анализ колебательного движения судна в нестандартных режимах качки. При исследовании этих режимов было принято решение ограничиться математическим описанием наиболее важных с точки зрения безопасности судна видов качки – килевой, бортовой и вертикальной. Система дифференциальных уравнений в этом случае имеет вид:

$$\begin{aligned}
 & (Jx + \mu_{\theta\theta})\theta'' + M_R(\theta') + M(\theta, \varphi_k, t) = M_x(t); \\
 & (D/g + \mu_{33})\zeta_G'' + v_\zeta \zeta_G' + \rho g S \zeta_G + \mu_{33} x_1 \psi'' + (v_{\zeta\psi} - v_0 \mu_{33})\psi' + (\rho g S l - v_0 v_\zeta)\psi = \\
 & \quad = -r_0(\rho g a_0 - \sigma^2 a_0'' - \sigma b_0') \cos \sigma t - r_0(\rho g b_0 - \sigma^2 b_0'' + \sigma a_0') \sin \sigma t; \quad (7) \\
 & (Jy + \mu_{55})\psi'' + [v_\zeta + (v_0^2/\sigma^2)v_\zeta]\psi' + (D_H\psi - v_0^2 \mu_{33})\psi + \mu_{33} x_1 \zeta_G'' + \\
 & \quad + (v_{\zeta\psi} + v_0 \mu_{33})\zeta_G' + (\rho g S l + v_0 v_\zeta)\zeta_G = -r_0(\rho g a_1 - \sigma^2 a_1'' - \sigma b_1') \cos \sigma t - \\
 & \quad - r_0(\rho g b_1 - \sigma^2 b_1'' + \sigma a_1') \sin \sigma t.
 \end{aligned}$$

Для инициализации модели морского волнения использовалась типовая аппроксимация частотного спектра в форме Пирсона-Московица:

$$S_\zeta(\omega) = A_W \omega^{-5} \exp[-B_W \omega^{-4}] \quad (8)$$

Коэффициенты A , B однозначно определяются через среднюю высоту и средний период волнения (по нулевому и второму моментам спектра). Результаты моделирования нештатных ситуаций при движении судна на нерегулярном волнении представлены на рис.4. Здесь отобраны четыре характерных ситуации (критические ситуации), которые могут наблюдаться в условиях эксплуатации и представляют собой нестационарные режимы колебаний судна под воздействием случайных возмущений.

Первая ситуация (рис.3А) соответствует возникновению катастрофического крена (характерный всплеск на осциллограмме) и последующего возврата динамической системы в устойчивый режим колебаний. Физические особенности этого явления связаны с воздействием крупной одиночной волны в составе нерегулярного волнения. Предельный случай такой ситуации – возникновение вследствие нелинейных эффектов одиночной разрушающейся волны («волна – убийца»), встреча с которой часто приводит к катастрофическим последствиям.

Вторая ситуация (рис.3В) возникает при внезапном налете шквала большой интенсивности, вследствие чего судно вовлекается в дрейф и после прохода шквала возвращается в устойчивый режим колебаний.

Третья ситуация (рис.3С) связана с переходом от одного стабильного состояния динамической системы к другому более неблагоприятному стабильного состоянию (смена аттрактора). Физические особенности такого перехода объясняются возникновением крена судна вследствие различных факторов. Одним из таких факторов является смещение груза в трюмах, другим – потеря начальной остойчивости при затоплении отсеков. Последняя ситуация является типичным примером динамики бистабильной системы. В этом случае в динамической системе имеются два аттрактора и нерегулярные колебания происходят около углов крена на правый или левый борт. Еще более сложный случай – поведение трехстабильной системы, которая характеризуется наличием трех аттракторных множеств. Возникновение такой сложной колебательной системы возможно в случае, когда судно имеет развитые надстройки, водонепроницаемость которых обеспечена в процессе эксплуатации.

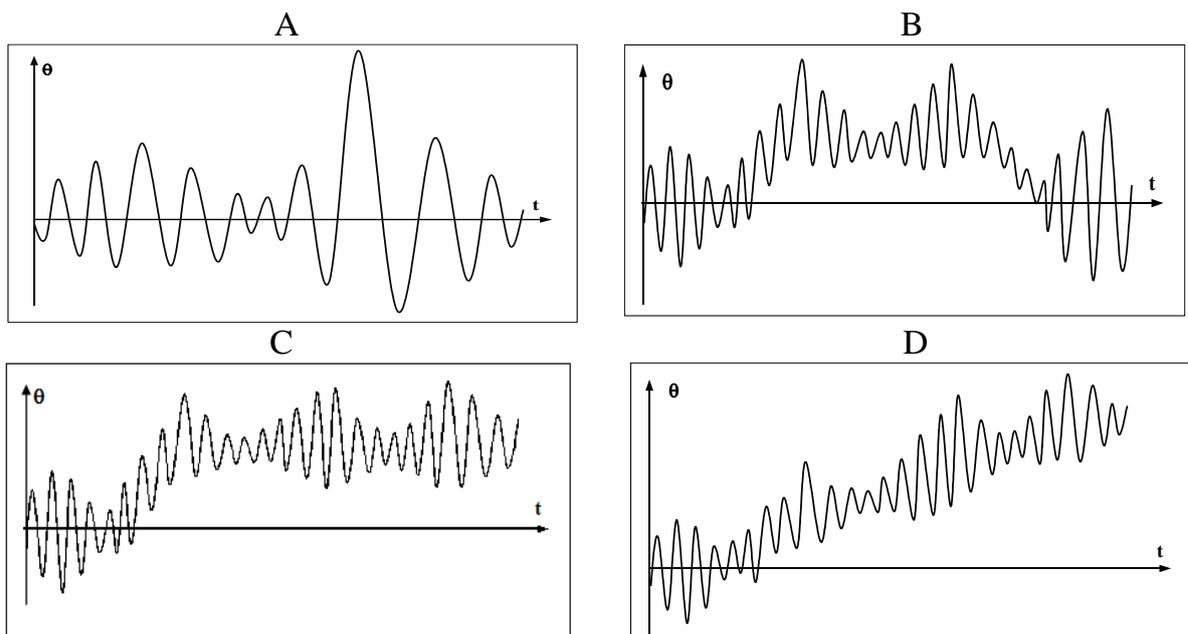


Рис.3. Типичные картины колебательного движения судна при возникновении нештатных ситуаций

Четвертая ситуация (рис.3D) характеризуется непрерывным нарастанием крена в результате поступления больших масс воды внутрь корпуса судна. Поведение такой динамической системы представляет типичный случай нестационарных колебаний и связано с непрерывным изменением динамики объекта и внешней среды. В процессе эволюции рассматриваемая система либо окажется устойчивой (перейдет в новый аттрактор), либо произойдет потеря устойчивости колебательного движения (опрокидывание).

Проведенные эксперименты показывают, что при взаимодействии судна с пакетами набегающих волн наблюдаются различные режимы колебаний (основной

и параметрический резонанс). Возникновение таких режимов особенно ярко проявляется при воздействии пакетов волн. Наиболее интересный режим – параметрический резонанс. На рис.4 представлены результаты моделирования динамики судна в режиме параметрического резонанса при воздействии группы волн.

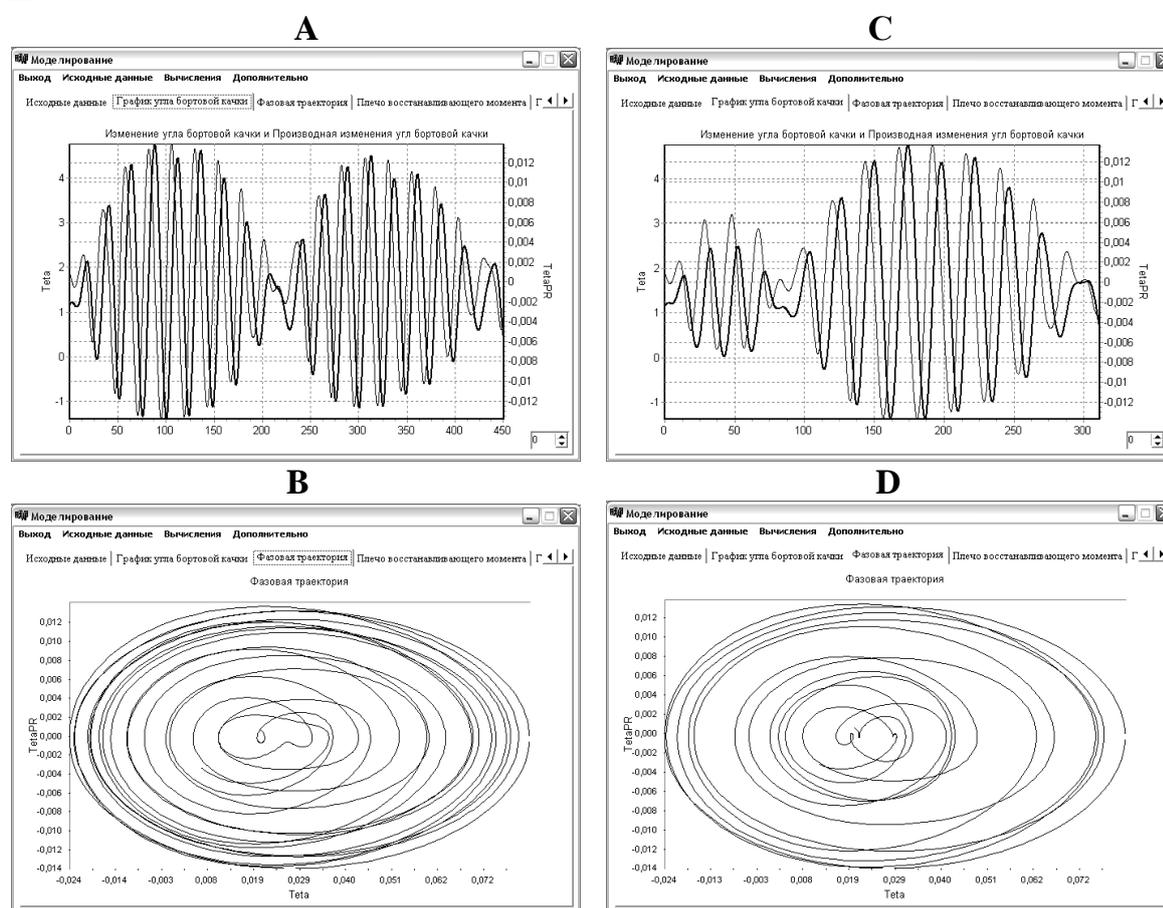


Рис.4. Формирование аттракторных множеств при воздействии пакетов резонансных волн: А,В – временные кривые и фазовые портреты при воздействии пакетов зыби; С,Д – временные кривые и фазовые портреты при последовательном воздействии пакетов волн различной интенсивности

Анализ результатов моделирования показал, что при выполнении известных частотных соотношений, определяющих начальные условия развития параметрических колебаний при прохождении группы волн, формируется сложные структуры колебательных режимов качки. Особенность этих структур состоит в том, что в этих условиях формируются аттракторные множества в виде неустойчивых предельных циклов.

Потеря устойчивости цикла-аттрактора в рассматриваемой однопараметрической системе происходит по различным сценариям. Интерпретация этих сценариев дается на рис. 5 и 6.

Наиболее простой из них связан с особенностями пакета зыби, при воздействии которого формируется предельный цикл, характеризующийся стабилизацией амплитуды колебаний вследствие влияния нелинейности (рис.5А).

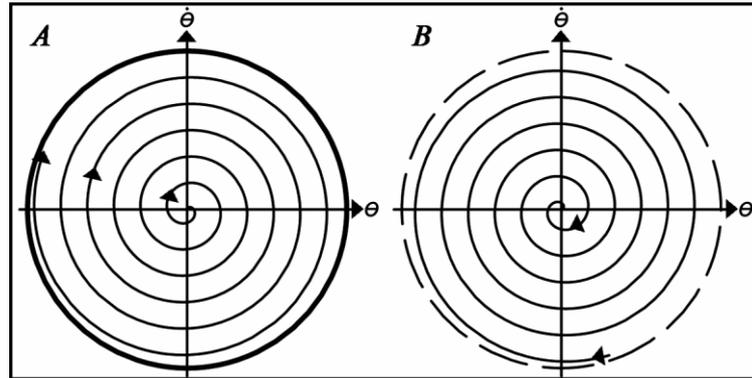


Рис.5. Формирование предельного цикла при воздействии группы волн

Этот цикл возникает на участке, где последовательность волн в пакете превышает определенное значение $(hw)_{CR}$, обеспечивающее колебательный режим с практически постоянной амплитудой θ_{max} . Однако в связи с последующим постепенным уменьшением высот волн в пакете нарушаются условия устойчивости и цикл исчезает (рис.5B).

Более сложный сценарий – столкновение с неустойчивым циклом (рис.6). Такая ситуация на практике встречается значительно реже и характеризуется последовательным прохождением пакетов волн, содержащих волны различной интенсивности. Например, первый пакет с небольшой высотой резонансных волн приводит к формированию предельного цикла малой, а второго – большой амплитуды. Возникновение и потеря устойчивости колебательного режима («рождение и смерть цикла» по терминологии А.А.Андропова) происходят вследствие ограниченности зоны резонансной качки на сравнительно небольшом временном интервале интенсивных колебаний при прохождении волновых пакетов.

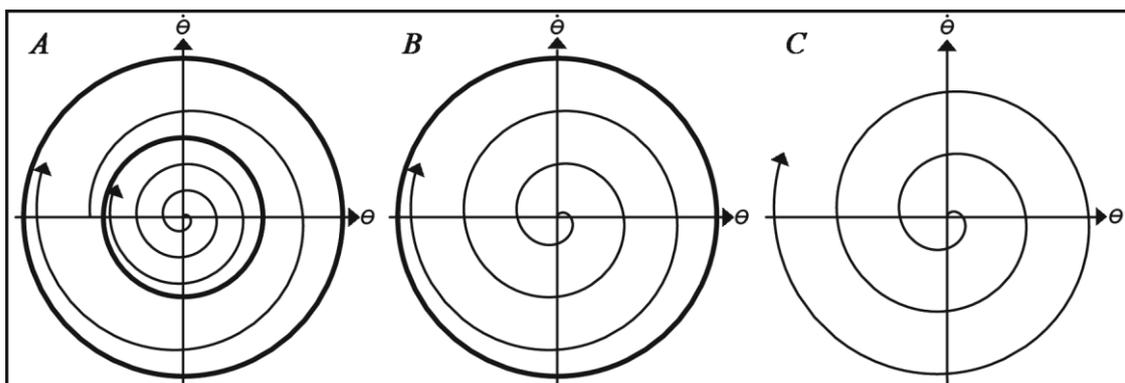


Рис.6. Возникновение (A) и потеря устойчивости цикла (B), (C)

Интересно отметить, что развитие параметрических колебаний при формировании предельного цикла в большей степени проявляется для волновых систем, содержащих группы почти регулярных волн. В этом случае за счет большей глубины модуляции параметра, стоящего в качестве множителя при периодической функции уравнения Матье и обусловленного резким изменением метацентрической высоты, формируются начальные условия, обеспечивающие преодоление «порога возбуждения» параметрического резонанса. В результате

возникновение и развитие параметрических колебаний отмечается даже на волнах относительно меньшей крутизны.

В процессе эксперимента также производилась оценка адекватности и топологии фазового пространства для нелинейной и линеаризованной математических моделей. Полученные данные свидетельствуют о практической невозможности сохранения фазовых потоков, порождающих странные аттракторы и детерминированный хаос, в линеаризованных системах.

Таким образом, в процессе анализа установлены различные сценарии возникновения аттракторных множеств, связанные со сложным нелинейным взаимодействием судна с внешней средой в условиях нерегулярного волнения. Закономерности поведения фазовых траекторий в условиях неустойчивости положены в основу разработки динамической базы знаний, позволяющей осуществлять прогноз и интерпретацию экстремальных ситуаций в бортовых ИС реального времени.

Глава 4 посвящена разработке программного комплекса, реализующего алгоритмы обработки информации при анализе нестандартных ситуаций (положение 4). Здесь рассматривается общий подход при разработке программных модулей, обеспечивающих контроль взаимодействия судна с внешней средой на основе конкурирующих вычислительных технологий, представленных традиционными, нечеткими и нейросетевыми моделями, а также модуля, реализующего анализ альтернатив и принятие решений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны принципы построения и функционирования динамической модели знаний при анализе и интерпретации информации в сложных ситуациях. Сформулированы основные задачи и методы обработки информации в процедурах логической системы знаний для конкурирующих вычислительных технологий. Разработана структура динамической модели знаний на основе принципа адаптивного резонанса.

2. Проведено математическое моделирование типичных задач анализа и интерпретации нестандартных ситуаций на основе дифференциальных уравнений, описывающих динамику судна на волнении. В качестве основных приложений рассмотрены типичные случаи взаимодействия судна с внешней средой, выделенные из множества сложных ситуаций, возникающих при эксплуатации судна. Среди них следует отметить возникновение резонансных режимов колебательного движения судна и формирование аттракторных множеств в сложных ситуациях: формирование предельного цикла при воздействии группы волн, «рождение и смерть цикла».

3. Предложен алгоритм анализа альтернатив и выбора предпочтительной вычислительной технологии в рамках концепции мягких вычислений. Сформулированы критерии оценки эффективности принимаемых решений по обеспечению безопасности судна в нестандартных ситуациях.

4. Разработан программный комплекс анализа и интерпретации нестандартных ситуаций динамики взаимодействия судна с внешней средой.

Сформулирован общий подход к формированию программных модулей обработки информации и дается их описание в рамках концепции мягких вычислений. На основе модели риска разработан программный модуль оценки эффективности принимаемых решений при контроле нестандартных ситуаций.

Опубликованные научные работы по теме диссертации

в изданиях, определенных ВАК:

1. Нечаев, Ю.И. База знаний и механизм логического вывода / Нечаев Ю.И., Петров О.Н. // Информационно-измерительные и управляющие системы. Т.4. – 2006. – №9. – С.23–27.
2. Нечаев, Ю.И. Интеллектуальная система «Мореходность» / Нечаев Ю.И., Петров О.Н., Тихонов Д.Г. // Информационно-измерительные и управляющие системы. Т.4. – 2006. – №9. – С.49–60.
3. Нечаев, Ю.И. Обработка измерительной информации в интеллектуальных системах посадки летательных аппаратов корабельного базирования / Нечаев Ю.И., Петров О.Н. // Информационно-измерительные и управляющие системы. Т.6. – 2008. – №8. – С.12–18.

и в других изданиях:

4. Петров, О.Н. Организация нечеткого логического вывода в интеллектуальных системах анализа и прогноза мореходных качеств судов / Петров О.Н. // Труды конференции молодых ученых и специалистов «МОРИНТЕХ-Юниор». – Санкт-Петербург, 2004. – С.112–113.
5. Нечаев, Ю.И. Система поддержки принятия решений на основе нечетких знаний о динамике судна в экстремальных ситуациях / Нечаев Ю.И., Петров О.Н. // Сборник докладов Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM-2005. Т.2. – Санкт-Петербург, 2005. – С. 66–69.
6. Нечаев, Ю.И. Анализ сложных ситуаций на основе принципа адаптивного резонанса в высокопроизводительных системах обучения и принятия решений / Нечаев Ю.И., Петров О.Н. // Труды XII Всероссийской научно-технической конференции «Телематика-2005». Т.1. – Москва, 2005. – С.301–302.
7. Петров, О.Н. Нечеткая система знаний на основе принципа адаптивного резонанса / Петров О.Н. // Сборник докладов шестой международной конференции «МОРИНТЕХ-2005». – Санкт-Петербург, 2005. – С.371–373.
8. Нечаев, Ю.И. Контроль динамики судна в сложных ситуациях на основе нечеткой системы знаний / Нечаев Ю.И., Петров О.Н. // Сборник докладов Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM-2006. Т.2. – Санкт-Петербург, 2006. – С.50–53.
9. Нечаев, Ю.И. Информационная поддержка оператора при анализе сложных ситуаций / Нечаев Ю.И., Петров О.Н. // Труды XIII Всероссийской научно-технической конференции «Телематика-2006». Т.1. – Москва, 2006. – С.149–150.

10. Нечаев, Ю.И. Формирование аттракторных множеств при исследовании динамики сложной системы в экстремальных ситуациях / Нечаев Ю.И., Петров О.Н. // Сборник докладов на 4-й Всероссийской научной конференции «Управление и информационные технологии УИТ-2006». Т.2. – 2006. – С.45–51.

11. Петров, О.Н. Анализ динамики судна в нештатных и экстремальных ситуациях / Петров О.Н. // Труды конференции молодых ученых и специалистов по морским интеллектуальным технологиям «МОРИНТЕХ-Юниор». – Санкт-Петербург, 2006. – С.102–104.

12. Нечаев, Ю.И., Моделирование динамики судна в сложных ситуациях / Нечаев Ю.И., Петров О.Н. // Тезисы докладов научно-технической конференции «проблемы мореходных качеств судов и корабельной гидромеханики (XLII Крыловские чтения). – Санкт-Петербург, 2006. – С.66–67.

13. Нечаев, Ю.И. Нечеткие модели при обработке информации в бортовых интеллектуальных системах / Нечаев Ю.И., Петров О.Н. // Сборник Докладов на X Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM-2007. Т.1. – Санкт-Петербург, 2007. – С.71–75.

14. Нечаев, Ю.И. Моделирование сложных ситуаций в интеллектуальных системах реального времени / Нечаев Ю.И., Петров О.Н. // Труды XIV Всероссийской научно-методической конференции «Телематика-2007». – Москва, 2007. – С.420–422.

15. Петров, О.Н. Программный комплекс динамической базы знаний интеллектуальной системы, функционирующей на основе принципа адаптивного резонанса / Петров О.Н. // Труды VI научно-технической конференции «Научное программное обеспечение в образовании и научных исследованиях. Выездная тематическая конференция в составе международной конференции МГУ «Современные информационные технологии и ИТ-образование». – Санкт-Петербург, 2008. – С.205–208.

16. Нечаев, Ю.И. Нейро-нечеткие модели контроля динамики сложного объекта в нестандартных ситуациях / Нечаев Ю.И., Петров О.Н. // Сборник Докладов на XI Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM-2008. Т.1. – Санкт-Петербург, 2008. – С.175–178.

17. Нечаев, Ю.И. Neuro-Fuzzy системы при анализе и прогнозе динамики сложного объекта / Нечаев Ю.И., Петров О.Н. // Труды XV Всероссийской научно-методической конференции «Телематика-2008». – Москва, 2008. – С.90–91.

18. Петров, О.Н. Модели знаний при контроле динамических ситуаций в бортовых интеллектуальных системах / Петров О.Н. // Искусственный интеллект. Т.4. – 2008. – С.282–290.

19. Nechaev, Yu.I. Fuzzy knowledge system for estimation of ship seaworthiness in onboard real time intelligence systems (Нечеткая система знаний оценки мореходности судна в бортовых интеллектуальных системах реального времени) / Nechaev Yu.I., Petrov O.N. // Proceedings of 16th International conference on hydrodynamics in ship design, 3rd International symposium on ship maneuvering. – Gdansk – Ostroda, Poland, 2005. – p.p.356–366.

20. Nechaev, Yu.I. Control of functioning regimes of on-board intelligence systems of safety monitoring (Контроль режимов функционирования бортовой

интеллектуальной системы контроля безопасности) / Nechaev Yu.I., Petrov O.N. // Proceedings of the 9th International ship stability workshop. – Hamburg, Germany, August 30 – 31, 2007. – p.p.1–9.

ИЦ СПбГМТУ, Лоцманская, 10

Подписано в печать 17.10.2008. Зак. 3662. Тир.100. 1,0 печ. л.

