

УДК656.61.052

**BULK CARGO SHIP DYNAMICS CONTROL VIA ONBOARD INTELLIGENCE SYSTEM ON THE BASIS OF CATASTROPHE THEORY****КОНТРОЛЬ ДИНАМИКИ СУДНА С СЫПУЧИМИ ГРУЗАМИ В БОРТОВОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРИИ КАТАСТРОФ**

**Yu. I. Nechaev<sup>1</sup>, DSc, professor, V. G. Sizov<sup>2</sup>, DSc, professor**  
**Ю.И. Нечаев<sup>1</sup>, д.т.н., профессор, В.Г. Сизов<sup>2</sup>, д.т.н., профессор**

<sup>1</sup>*St.-Petersburg State Marine Technical University, Russia*

<sup>2</sup>*Odessa National Maritime Academy, Ukraine*

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,*

<sup>2</sup>*Одесская Национальная Морская Академия, Украина*

**ABSTRACT**

Application of modern catastrophe theory in the problem of operational bulk cargo ship dynamic control via onboard intelligence system is discussed.

Interaction dynamics is described in scope of V. G. Sizov hypothesis and structured knowledge system, formed on the fuzzy logic basis. Testing results for the developed knowledge system for typical situations, arising in ships' operation experience, are given in the paper.

**Keywords:** bulk carrier vessel, knowledge system, catastrophe theory, dynamics control.

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами**

Проблема создания системы контроля динамики судна с сыпучими грузами на основе бортовых интеллектуальных систем (БИС) представляет собой одно из актуальных направлений реализации новых принципов обработки информации в сложных динамических средах [1] – [29]. Управление процессом функционирования БИС ведется с использованием средств высокопроизводительных вычислений для динамических объектов в мультипроцессорной вычислительной среде на основе измерительной информации, структурированной базы знаний и методов математического моделирования. Концептуальный базис БИС ориентирован на решение проблемы обеспечения безопасности мореплавания судов и плавучих технических средств освоения океана. Формирование управления БИС осуществляется в концептуальном блоке, позволяющим сформулировать задачу, функции и способы управления БИС, генерацию функциональной и организационной структуры БИС. Оптимизация вариантов

состава и структуры БИС ведется в рамках критериального базиса с использованием национальной и международной систем нормирования. Моделирование режимов функционирования БИС реализовано на основе репозитория сервисов, принципов обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде и методов теории катастроф [13]. Результаты моделирования позволяют установить соответствие параметров состава и структуры БИС заданным критериям и входным характеристикам системы.

Функциональный блок, содержащий алгоритм контроля динамики судна с сыпучими грузами, организован по принципу многорежимной БИС, осуществляющей мониторинг взаимодействия судна с внешней средой в различных условиях эксплуатации. Особенность алгоритма состоит в том, что его функционирование реализуется в условиях значительной неопределенности, порождаемой сложностью трудноформализуемой задачи. Сыпучие грузы отличаются большой подвижностью частиц. При крене судна сыпучий груз перемещается и образуется кренящий момент, приводящий к ухудшению остойчивости. Начало пересыпания происходит при определенном угле, который называется углом естественного откоса. Наклонение судна на угол больший угла естественного откоса сопровождается пересыпанием груза. Динамика судна с сыпучими грузами – одна из наименее изученных областей, определяющих общее поведение судна на волнении [17],[21].

### **Постановка задачи**

Гидродинамическая модель динамики судна с сыпучими грузами может быть построена на основе анализа системы дифференциальных уравнений движения сыпучей среды. Смещающаяся часть сыпучего груза рассматривается как идеальная жидкость с введением элементов кулоновского трения [21]. В результате достигается выполнение функции диссипативных сил, не нарушающих потенциальности течения. Сложность построения алгоритма контроля на базе гидродинамической модели, построенной в рамках гипотезы идеальной жидкости и элементов кулоновского трения, привела к необходимости использования более физической модели взаимодействия, основанной на гипотезе [17]. Именно эта гипотеза принята в качестве эталонной модели при интерпретации динамики сыпучего груза в справочнике по теории корабля [21]. Упрощающие предположения и структура модели интерпретации позволяют построить компактный алгоритм поведения судна с сыпучими грузами, реализуемый в БИС в режиме реального времени. Этот алгоритм реализован в качестве встроенной процедуры в механизме логического вывода динамической базы знаний БИС, функционирующей на основе информации, получаемой от датчиков измерительной системы. Важная роль при формировании этой информации принадлежит датчикам, отслеживающим поведение свободной поверхности сыпучего груза при качке судна на нерегулярном волнении. Совместно с результатами динамических измерений параметров колебательного движения судна на волнении эти данные образуют информационный вектор [4],[9],[19]:

$$J = (\theta, \psi, \dots, \xi, \theta(G), t \in [t_0, T]), \quad (1)$$

где  $\theta, \psi, \dots, \xi$  - параметры, определяющие состояние судна;  $\theta(G)$  – угловые перемещения свободной поверхности сыпучего груза.

Поведение судна как сложной динамической системы описывается вектором состояния  $x = \{x_i\}$  ( $i=1, \dots, n$ ). На систему воздействуют внешние возмущения, характеризуемые вектором  $W = \{W_k\}$  ( $k=1, \dots, K$ ). Выходные координаты системы  $y = \{y_j\}$  ( $j=1, \dots, m$ ) представляют собой регулируемые величины, зависящие от управляющих воздействий  $U = \{u_q\}$  ( $q=1, \dots, Q$ ), под которыми понимаются практические рекомендации по обеспечению безопасности мореплавания. Функционирование БИС (рис.1), осуществляющей оперативный контроль и выдачу практических рекомендаций  $R_1, \dots, R_n$  в условиях неопределенности  $U_1, \dots, U_Q$  обеспечивается на основе обработки информации в режиме реального времени.



Рис.1. Модульная структура программного комплекса

Процесс контроля экстремальных ситуаций в среде БИС представляет собой сложное нелинейное преобразование информации в рамках самоорганизующейся системы. При этом каждая из подсистем вычислительного комплекса работает в соответствии с принятой коллективной стратегией, определяющей поведение судна в пространстве состояний. Выделение подмножества разрешенных и запрещенных состояний происходит на основе соотношений [4]:

$$\{R_A(t)\}_k^\beta = F_\beta(\{R_A(t)\}, R_A(t)_k, k); \{R_A(t)\}^\beta = \bigcup_{k=1}^q \{R_A(t)\}_k^\beta; \quad (2)$$

$$\{P_A(t)\}_l^\alpha = \{P_A(t)\} / \{R_A(t)\}^\beta, (k = 1, \dots, q, l = 1, \dots, p). \quad (3)$$

Здесь  $\{R_A(t)\}_k^\beta$  и  $\{R_A(t)\}^\beta$  – подмножества запрещенных состояний для всей БИС и для отдельных подсистем;  $\{P_A(t)\}_l^\alpha$  – подмножество разрешенных состояний.

Интерпретация соотношений (2) и (3) в рамках модели современной теории катастроф позволяет представить динамические картины взаимодействия судна с внешней средой в виде последовательности состояний, отображенных в виде фрактальных структур. Разработанные алгоритмы анализа и прогноза ди-

намики исследуемой нестационарной системы в рамках парадигмы обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде открывают новые возможности использования алгоритма контроля динамики сыпучих грузов при исследовании эволюции судна под воздействием внешних возмущений.

### **Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов**

#### **1. Динамическая модель судна с сыпучими грузами в рамках современной теории катастроф**

Динамическая модель катастрофы отображает геометрическую и аналитическую интерпретацию текущих ситуаций на основе парадигмы обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде [13]. Она является универсальной конструкцией модифицированного образа катастрофы, содержащей типичные элементы поведения сложной динамической системы:

$$DM(Cat) = \langle H(Cat), A(Cat) \rangle, \quad (4)$$

где  $\langle H(Cat), A(Cat) \rangle$  – компоненты, интерпретирующие динамическую среду взаимодействия на основе геометрической и аналитической модели катастрофы.

Геометрическая интерпретация физической картины взаимодействия на основе компоненты  $H(Cat)$  имеет вид:

$$H(Cat) = \langle B(\theta, t), GZ((\theta, t), F(W(t), D(t))) \rangle, \quad (5)$$

где  $B(\theta, t)$  – бифуркационное множество, представляющее собой образ особого множества в пространстве управляющих параметров;  $GZ(\theta, t)$  – многообразие, определяющее динамическую среду, интегрирующую влияние внешних возмущений и особенностей динамики объекта;  $F(W(t), D(t))$  – множество, отображающее динамическую среду, определяющую внешнее возмущений и структурные изменения при описании поведения исследуемого объекта в процессе эволюции системы.

Аналитическая интерпретация физической картины взаимодействия (рис.2) на основе компоненты  $A(Cat)$  имеет вид:

$$A(Cat) = \langle A(CR), A((PH), A(NF)) \rangle, \quad (6)$$

где  $A(CR)$  — математическая модель, отображающая оценку динамической среды взаимодействия на основе критериальных соотношений, разработанных в рамках стандартных алгоритмов исследуемой проблемной области;  $A(PH)$  — математическая модель, отображающая оценку динамики взаимодействия с помощью теории стохастических систем, теории детерминированного хаоса и синергетической парадигмы;  $A(NF)$  — математическая модель, отображающая оценку динамической среды на основе нейро-нечеткой системы.

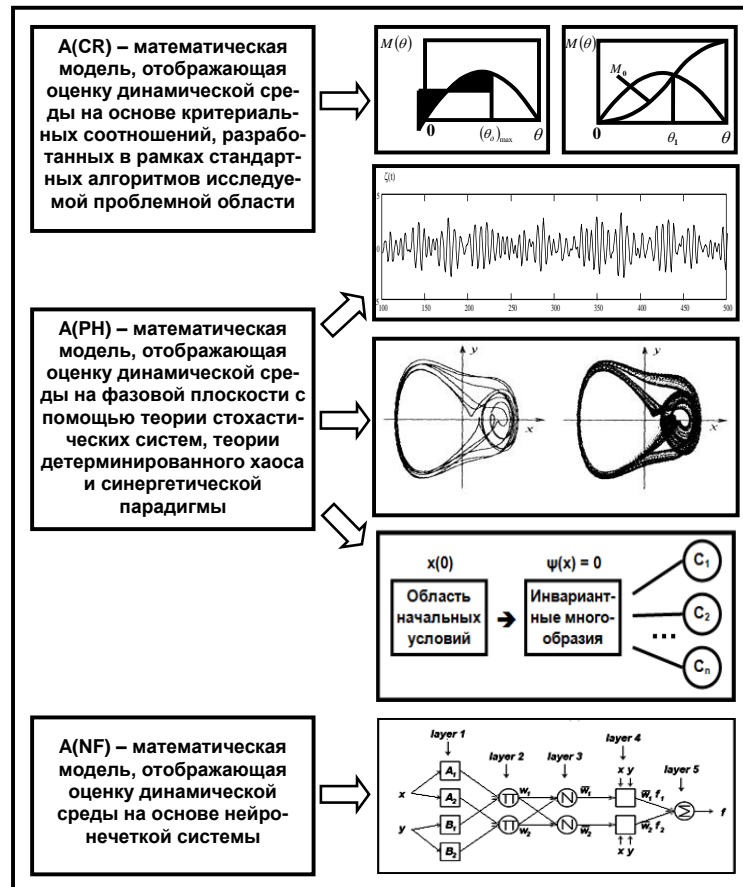


Рис.2. Динамическая модель катастрофы:аналитическая интерпретация

Информация о состояниях исследуемых множеств при геометрической и аналитической интерпретации динамики судна с сыпучими грузами представляется в виде информационных массивов числовых данных о функциональных зависимостях  $B(\theta,t)$ ,  $GZ(\theta,t)$ ,  $C(\theta,t)$ , характеризующих эти множества.

## 2. Особенности динамики судна с сыпучими грузами

Среди известных подходов к оценке динамики судна с сыпучими грузами следует выделить способ, основанный на гипотезе [17],[21]. Простота и наглядность этого способа позволяет построить расчетную схему алгоритма в такой последовательности.

**Зависимость между углом крена и углом пересыпания.** Для выяснения зависимости между углом крена и углом пересыпания груза введем следующие обозначения. Пусть  $\theta$  – угол крена, положительный на правый и отрицательный на левый борт. Введем угол  $\alpha_1$ , при котором начинается пересыпание груза на правый борт, и угол  $\alpha_2$  – при крене в противоположную сторону. Обычно  $\alpha_2 < \alpha_1$ , так как наличие качки приводит к раннему началу пересыпания. Обозначим через  $\beta$  угол пересыпания и будем считать, что при  $\theta > \beta$  нарастание  $\beta$  происходит по линейному закону, т.е.  $|\Delta\beta| = |\Delta\theta|$ . Используя это условие, можно представить картину изменения рассмотренных углов в виде следующей схемы (рис.3).

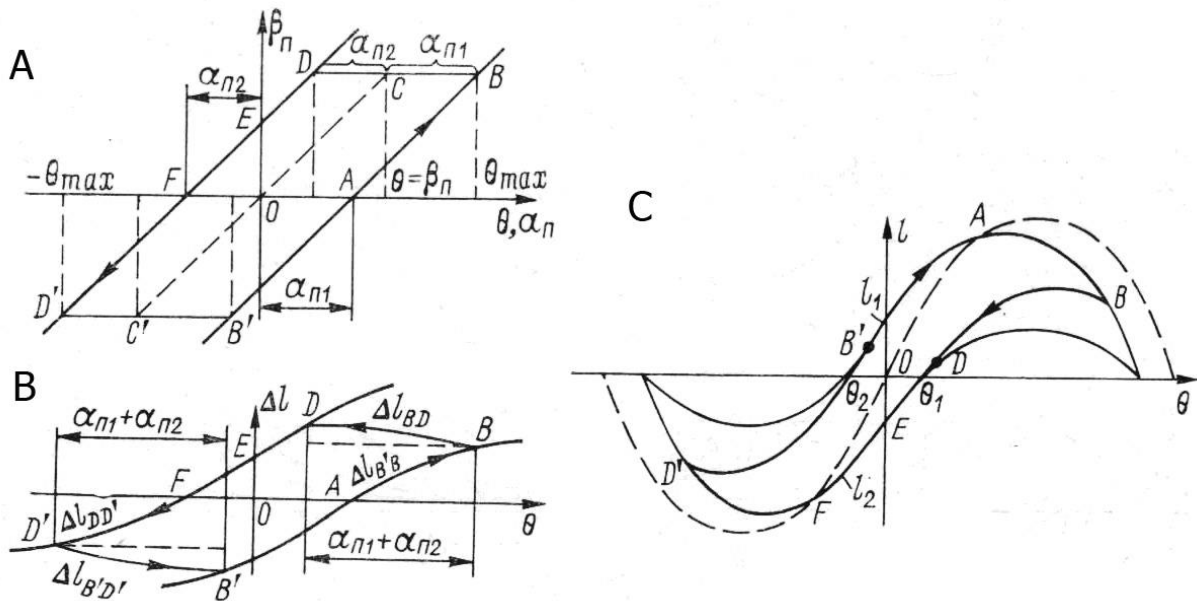


Рис.3. Диаграммы, характеризующие влияние сыпучего груза: А - зависимость  $\beta$  от  $\theta$ ; В – кренящий момент от пересыпания груза; С – исправленная диаграмма статической остойчивости.

Для выяснения закономерности изменения углов  $\theta$  и  $\beta$  рассмотрим диаграмму, представленную на рис.3А. Из этого рисунка следует, что при крене судна до угла  $\alpha$  угол  $\beta = 0$ , так как груз еще не начал пересыпаться. При  $\theta > \alpha_1$  груз начинает пересыпаться и угол  $\beta$  увеличивается пропорционально приращению  $\theta$ . После того, как судно достигнет максимального угла крена  $\theta_1$  (точка В) груз прекращает пересыпаться ( $\beta = \beta_{max}$ ). Начиная от точки В судно движется в обратную сторону и в точке С имеем  $\theta = \beta_{max}$ . Очевидно, что в точке С груз еще не начнет пересыпаться, так как его поверхность совпадает в действующей ватерлинией. После того как судно отклонится от точки С на угол  $\alpha_2$  и придет в точку D, груз будет пересыпаться в обратном направлении. В точке F поверхность груза снова займет первоначальное положение и далее угол  $\beta$  изменит знак и все будет происходить аналогично тому, как это мы рассмотрели при крене судна на правый борт.

**Кренящий момент от пересыпания груза.** При вычислении кренящего момента от пересыпания груза использованы выражения, приведенные в справочнике [21], на базе которых на рис.3В изображена зависимость  $m(\theta) = f(\theta)$ . Такая форма представления момента от влияния сыпучего груза более предпочтительна, чем зависимость  $m(\theta) = f(\beta)$ , так как это позволяет легко корректировать диаграмму статической остойчивости.

При построении кривой  $m(\theta) = f(\theta)$  следует учитывать, что при крене от точки В до точки D угол  $\beta = const$  и  $m(\beta) = const$ . Однако  $m(\theta)$  все же будет возрастать за счет уменьшения угла  $\theta$  и роста  $\cos \theta$ , так как  $m(\theta) = \gamma_G m(\beta) \cos(\theta - \varphi_\beta)$ . От точки D к точке E и далее угол  $\beta$  уменьшается и  $m(\theta)$  также уменьшается. В точке F угол  $\beta = 0$ ,  $m(\theta) = 0$  и груз будет пересыпаться в исходное положение.

ние. После точки F начинается пересыпание груза в обратном направлении и момент меняет знак.

**Изменение диаграммы статической остойчивости.** Восстанавливающий момент с учетом влияния сыпучего груза определяется по формуле

$$M(\theta)_G = M(\theta) - m(\theta), \quad (7)$$

где  $M(\theta)$ -восстанавливающий момент судна с имеющимся сыпучим грузом, но без учета его пересыпания;  $m(\theta)$  - кренящий момент от пересыпания груза.

В соответствии с этой формулой производится корректировка исходной диаграммы статической остойчивости (рис.3С) при крене судна на правый и левый борт. При этом учитывается, что при крене от точки А к точке В момент  $m(\theta)$  растет и разность  $M(\theta) - m(\theta)$  уменьшается. От точки В к точке D момент  $m(\theta)$  продолжает расти и ординаты диаграммы снижаются. Таким образом, необходимо все время вычитать из пунктирной кривой  $M(\theta)$  ординаты  $m(\theta)$ . Ниже представлены расчетные формулы для вычисления моментов  $m(\theta)$ ,  $m(\beta)$  и косинуса угла  $\cos(\theta - \varphi\beta)$ :

$$m(\theta) = \gamma_G \Delta v h_1 h_2 = \gamma_G m(\beta) \cos(\theta - \varphi_\beta); \quad (8)$$

$$m(\theta) = \gamma_G \iint \left[ \frac{1}{2} a^2 d\varphi^2 a \cos(\theta - \varphi) + \frac{1}{2} b^2 d\varphi^2 b \cos(\theta - \varphi) \right] dx = \\ = \gamma_G \int \cos(\theta - \varphi_\beta) d\varphi \int (a^3 + b^3) dx;$$

$$m(\theta) = \gamma_G \int i_x \cos(\theta - \varphi) d\varphi = \\ = \gamma_G \cos \theta \int i_x \cos \varphi d\varphi + \gamma_G \sin \theta \int i_x \sin \varphi d\varphi; \quad (9)$$

$$m(\beta) = \Delta v g_1 g_2 = \int_0^\beta i_x d\varphi; \quad \cos(\theta - \varphi_\beta) = m(\theta) / m(\beta). \quad (10)$$

**Изменение опрокидывающего момента.** Опрокидывающий момент  $M_c$  определяется с учетом амплитуды качки  $\theta_k$ , которая может быть определена по Правилам Регистра Судоходства. Для установления значения  $M_c$  используется исправленная диаграмма статической остойчивости при крене судна на правый и левый борт. Решение этой задачи состоит в следующем.

При определении опрокидывающего момента  $M_c$  надо построить переходную кривую с нижней ветви кривой на верхнюю, соответствующих крену судна правый и левый борт. При построении переходной кривой графические построения выполняются в порядке, описанном в работе [17]. Построение начинается от точки пересечения нижней кривой с осью абсцисс. На нижней кривой через равные интервалы намечаются точки, характеризующие начало перехода с нижней кривой на верхнюю. Для этих точек строятся переходные кривые, аналогичные тем, которые были рассмотрены в задаче определения кривой восстанавливающего момента. Далее отмечаются точки пересечения переходных кривых с осью абсцисс. После чего от горизонтальной линии откладывается величина амплитуды качки  $\theta_k$  и находится точка, представляющая собой угол статического крена, вызванный пересыпанием груза. Дальнейшие построения при

определении опрокидывающего момента аналогичны рассматриваемым без учета пересыпания груза в задачах оценки остойчивости по Правилам Регистра Судоходства.

### 3. Архитектура и функциональные блоки БИС

Функциональная модель программной среды БИС определяет процесс обработки информации на основе интеллектуальных технологий, методов современной теории катастроф и высокопроизводительных средств вычислений. Концептуальный блок реализует выработку решений с использованием парадигмы обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде [11] на основе принципа конкуренции и принципа формализации нечеткой информации. Выбор предпочтительной вычислительной технологии обработки данных осуществляется на основе вычислительных сервисов (рис.4) обеспечивающих функции интерпретации решений при оценке динамики внешней среды: ветер (А), волнение (В), оценке динамики взаимодействия в стандартных (С), экстремальных (D) и штатных (Е) ситуациях, генерации и анализе альтернатив (F), выработке практических рекомендаций (G), оценке риска принимаемых решений (H).

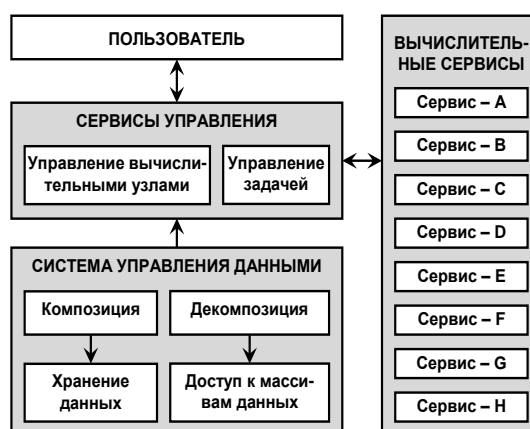


Рис.4. Сервисно-распределенная архитектура БИС

Блок информационной среды анализа альтернатив и принятия решений получает информацию о доступных сервисах и их онтологических описаниях и создает набор альтернативных вариантов решений. Управление БИС осуществляется с использованием основных функций управления, реализующих интеллектуальную поддержку принятия решений на основе модуля адаптации, реализующего процедуры адаптивного обучения за счет управления вычислительным процессом с динамически меняющейся информацией. Помимо этого, модуль адаптации осуществляет реализацию принципа конкуренции при выборе предпочтительной вычислительной технологии, интеграцию знаний в условиях неопределенности характеристик задачи и неполноты исходной информации с использованием основных операций прикладных вычислительных сервисов (А) – (Н).

Оценка вырабатываемых решений ведется на основе функции выбора [12]. Поток информации определяет оценку эффективности решения на основе критериальной базы, включающей локальную и глобальную системы нормирова-



ния. Формализация неопределенности и многокритериальный анализ рассматриваемого решения осуществляется по критерию информационной эффективности, а нечеткий вывод и принятие решения передаются в блок управляющих воздействий.

#### **4. Результаты моделирования динамики судна с сыпучими грузами на основе фрактальной геометрии**

Современная вычислительная математика и компьютерная графика предоставили нам эффективное средство геометрической интерпретации связей и значений характеристик взаимодействия судна с внешней средой до сих пор скрытые от нас. Возникающие на экране дисплея картины взаимодействия открывают новые пути исследования закономерностей, позволяющих понять физические картины поведения судна. При изучении сложных процессов и явлений нам часто приходится мыслить геометрическими образами и использовать эстетические категории, определяющие компромисс между простотой и адекватностью при построении моделей сложных физических систем. Не случайно в последние годы исследователи все чаще обращаются к теории сложности, особенно при разработке систем реального времени.

Формально модель знаний при контроле динамики судна с сыпучими грузами может быть представлена в виде структуры [12]:

$$M(\text{Fract-Know}) = \{F/\text{Cat}\}: J(X) \rightarrow J(Y), \quad (11)$$

где  $\{F/\text{Cat}\}$  – фрактальная структура, реализующая модель катастрофы;  $J(X)$ ,  $J(Y)$  – вход и выход модели.

Особенность рассматриваемой фрактальной структуры состоит в том, что ее формирование реализуется путем преобразования множества  $GZ(\theta, t)$ . Как следует из работы [12], область  $GZ(\theta, t)$  представляет собой интегрированную модель текущей ситуации. Эта модель отображает взаимное влияние двух компонент исследуемой математической модели: восстанавливающей  $M(\theta, t)$  и возмущающей  $M(t)$ . Причем изменение внешнего возмущения вызывает деформацию компоненты  $M(\theta, t)$ , на основе которой определяются нелинейные функции при периодической составляющей модифицированного уравнения Матье [12],[24].

Оператор оценки истинности (адекватности) отображения модели катастроф с помощью фрактальной структуры имеет вид

$$J\{\text{Cat}(\text{Know}/X)\} \rightarrow J\{\text{Cat}(\text{Know}/Y)\}, \quad (12)$$

где  $J\{\text{Cat}(\text{Know}/X)\}$ ,  $J\{\text{Cat}(\text{Know}/Y)\}$  – оператор, преобразующий элементы знания фрактальной структуры на входе и выходе системы знаний.

Многообразие результатов работы фрактальной структуры определяется как

$$\langle WF(a/X), F(b/Y), F(e/E) \rangle. \quad (13)$$

Здесь  $F(a/X)$ ,  $F(b/Y)$ ,  $F(e/E)$  – функции интерпретации, описывающие элементы знания на входе, выходе и при описании эволюции фрактальной структуры.

Эволюция фрактальной структуры (поле импульсов) в процессе развития текущей ситуации определяется в виде потока информации

$$\text{Imp: } J(e/E): \{J(x/X)\} \rightarrow \{J(y/Y)\}, \quad (14)$$

где  $J(e/E)$  – формальная система, задающая поток информации в модельно-параметрическом пространстве развития текущей ситуации.

Траектория, реализуемая преобразованием (14) представляет собой последовательность состояний динамической системы, смена которых осуществляется в зависимости от уровня действующих возмущений и особенностей динамики объекта. Управление судном в процессе развития эволюции формируется на основе рекомендаций, вырабатываемых БИС на основе данных динамических измерений, интегрированной системы знаний и моделирования.

Соотношения (13) – (16) позволяют представить текущую ситуацию и управление БИС как преобразование:

$$\text{Str}(\tau/t): J\{\text{Imp}(x/X, y/Y, e/E)\} \rightarrow J\{\text{Out}(x/X, y/Y, e/E)\}, \quad (15)$$

$$U: \text{Imp}(\tau/T) \rightarrow \text{Out}\{\tau_0/T\}, \quad (16)$$

где  $\tau_0/T$  – целевой аттрактор динамической системы, движение к которому формируется с помощью гипотез и упрощающих предположений в рамках синергетической парадигмы.

Фрактальная интерполяция при математическом описании текущей ситуации произведена на основе принципа сложности, обеспечивающего сжатие информации и представление эволюции сложной системы в виде простого и легко интерпретируемого геометрического образа [12],[20]. Выбор «регуляризатора» основан на принципе Минимальной Длины Описания (Minimal Description Length или MDL) [26], формализующий известный принцип “бритвы Окаама”. Для набора исходных данных и множества моделей принцип MDL предпочитает модель с кратчайшим эффективным описанием, которая минимизирует сумму двух компонент: длины эффективного описания самой модели (в битах) и длины эффективного описания данных, закодированных с помощью этой модели. Более сложная модель (гипотеза  $H$ ) может лучше описывать данные, но требует для своего собственного описания программы большей длины. Если же гипотеза  $H$  описывает все данные достаточно точно, то вторая компонента вообще отсутствует. С другой стороны, если  $H$  – тривиальная гипотеза, тогда данные описываются буквально и какое-либо обобщение (сжатие) отсутствует.

Задача фрактальной интерполяции множества данных

$$\{(x_i, F_i) \in \mathbb{R}^2, i=0,1,2,\dots,N\}, \quad x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_N \quad (17)$$

состоит в построении системы итеративных функций в  $\mathbb{R}^2$  таким образом, чтобы ее аттрактор  $G$  являлся бы графиком непрерывной функции

$$f: [x_0, x_N] \rightarrow \mathbb{R}, \quad (18)$$

которая интерполирует данные [25].

На основе соотношений (17) и (18) можно реализовать алгоритм преобразования информации в рамках фрактальной геометрии. При этом алгоритм должен учитывать особенности динамической структуры катастрофы [12]. Для повышения эффективности отображения текущей ситуации в сложных динамических средах геометрические образы фракталов дополняются структурами, реализуемыми на основе когнитивной парадигмы. В качестве иллюстрации на рис.5 приведены результаты моделирования двух сценариев развития текущей ситуации с помощью фрактальной геометрии:

$$ZG(\theta t) \rightarrow \Omega(S,t), ZG(\theta t) \rightarrow \Omega(Cap,t), \quad (19)$$

где первый сценарий соответствует случаю стабилизации ситуации в процессе движения судна к целевому аттрактору (стабильное состояние системы), второй – потере устойчивости (возникновение катастрофы). На рисунках использованы следующие обозначения:  $t, T$  – время,  $\tau_0$  – характерный интервал времени;  $\Xi(t)$  – энтропия процесса;  $Z_G$  – аппликата ЦТ судна;  $G_0, G_1, \dots, G_4$  – положения ЦТ;  $GZ(\theta, t)$  – область, интегрирующая динамическую среду с помощью фрактальной геометрии;  $\Omega(S,t)$  и  $\Omega(Cap,t)$  – области, отображающие стабилизацию ситуации и потерю устойчивости (опрокидывание).

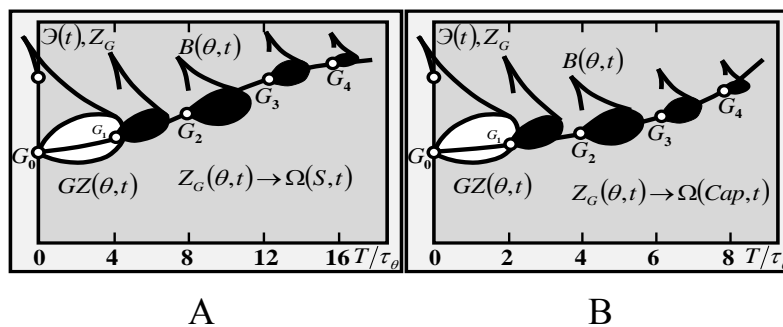


Рис.5. Эволюция динамической системы в условиях стабилизации ситуации (А) и при потере устойчивости движения (В)

Управленческие решения с помощью логической системы знаний привели к перестройке геометрической сцены в направлении движения к целевому аттрактору, который формируется путем последовательного преобразования информации на основе динамической базы знаний ИС.

При исследовании эволюции динамической системы на основе фрактальной геометрии теоретический и практический интерес представляет проблема выхода системы за предельные состояния, определяемые особенностями поведения судна при взаимодействии с внешней средой. Формальный аппарат переходов состояний динамической системы основан на представлении процесса в рамках нечеткого логического базиса. Алгоритм контроля динамики объекта реализуется с помощью функций принадлежности, определяемых системой нечеткой логики со свойством универсального аппроксиматора функций [9],[19].

Модель смены технических состояний в стохастических системах может быть описана полумарковским процессом. Для моделирования поведения во времени нечетких состояний может быть использован нечеткий аналог полу-

марковской цепи [2]. При этом «вложенная» цепь характеризует переходы между гипотезами, а моменты переходов определяются условием достижения прогнозом своих границ. Нечеткая последовательность переходов состояний  $H_{k-1}(j) \rightarrow H_k(i)$  описывается нечетким отношением  $F(H_k, H_{k-1})$ , заданным на множестве  $H_k \times H_{k-1}$  и отражающим априорные знания о возможных переходах состояний, определенных на основе предварительного анализа динамики текущей ситуации. Результаты анализа позволяют построить матрицу переходов  $\pi(H_k, H_{k-1})$  размерности  $(N+1) \times (N+1)$  с ФП  $\mu_{ij}(H_k, H_{k-1})$ , номера строк в которой соответствуют конечным состояниям, а столбцы – начальным. Для определения состояния в момент  $k$  используется правило [2]:

$$\langle \text{if } H_{k-1} = H_{k-1}(j), \text{ then } H_k = H_k^i(i) \rangle \quad (20)$$

с функциями принадлежности (ФП)  $\mu(H_k)$  в виде соотношения

$$\mu(H_k) = \sup T(x, y) \{(\mu(H_{k-1}), \mu(H_k, H_{k-1}))\}. \quad (21)$$

где  $T(x, y) = \min(x, y)$ .

Уточнение гипотез осуществляется по данным динамических измерений для  $H_k(i)$  с учетом данных предыдущего шага  $H_{k-1}(j)$ . Проверка выполняется в два этапа – прогноз гипотез от  $H_{k-1}(j)$  к  $H_{k,k-1}^i(i)$  и корректировка прогноза по измерениям при преобразовании  $H_{k,k-1}^i(i)$  к  $H_k(i)$ .

Диагностирование нарушений при исследовании эволюции динамической системы с помощью фрактальной геометрии производится на основе модели прогноза, построенной путем генерации альтернатив в рамках принципа конкуренции. Решение о наличии параметрических отказов на шаге  $k$  принимается при превышении ФП состояний  $S_k(0)$  и  $S_k(1)$  заданного уровня.

### **Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению**

Таким образом, ключевыми понятиями при интерпретации динамических ситуаций судна с сыпучими грузами методами теории катастроф являются самообучение и самоорганизация БИС в условиях неточности и неопределенности исходной информации. Решение этих проблем осуществляется путем построения рациональных расчетных схем интерпретации текущей ситуации. Значительный эффект при построении решений при сложной эволюции ДО может быть достигнут за счет использования синергетической парадигмы. Основным аспектом этой теории является бифуркация, представляющая собой неустойчивое, критическое состояние и определяющая набор возможных путей развития системы в сложной динамической среде. Реализация нового подхода к использованию методов теории катастроф при интерпретации текущих ситуаций открывает возможности рассмотрения динамики взаимодействия в рамках сложной открытой системы, закономерности эволюции которой позволяют объяснять многие ее феномены и предсказывать сущности свойств и направления развития.

В основе информационного и экспериментального материала при функционировании БИС на основе методов теории катастроф лежит математический аппарат. Применение этого аппарата встречает большие сложности в трудно-

формализуемых задачах, особенно в ситуациях, характеризующихся непрерывным изменением динамики объекта и внешней среды [5],[9],[19]. В условиях неопределенности и неполноты исходной информации [8] понятие «точность» должно быть освобождено от догматического толкования, которое до сих пор используется в работах по исследованию сложных систем с помощью традиционного математического аппарата [6].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ахромеева Т.С., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Парадоксы мира нестационарных структур / Компьютеры и нелинейные явления. М.: Наука, 1988.
2. Байхельд Ф. Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. – М.: Советское радио, 1988.
3. Блинов А.Н., Осипов А.В. Диагностирование параметрических отказов методами нечеткой логики // Сборник докладов Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM-2007. Санкт-Петербург. 2007. т.1, с.224 – 229.
4. Бортовые интеллектуальные системы. Часть 1. Авиационные системы. Часть 2. Корабельные системы. – М.: Радиотехника, 2006.
5. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. В двух книгах. – М.: Мир, 1984.
6. Клайн М. Математика. Утрата определенности. М.: Мир, 1985.
7. Красовский А.А. Аттракторы и синтез управления в критических режимах // Изв. РАН. Теория управления с высоким уровнем искусственного интеллекта // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2001. №1, с.69 – 75.
8. Нариньяни А.С. Не-факторы: неточность и недоопределенность – различие и взаимосвязь // Известия РАН. Теория и системы управления. №5. 2000, с.44 – 56.
9. Нейрокомпьютеры в интеллектуальных технологиях XXI века. – М.: Радиотехника, 2011.
10. Нечаев Ю.И. Искусственный интеллект: концепции и приложения. – Санкт-Петербург. ГМТУ, 2002.
11. Нечаев Ю.И. Математическое моделирование в бортовых интеллектуальных системах реального времени // Труды 5-й всероссийской научно-технической конференции «Нейроинформатика – 2003». М.:МИФИ.2003. Лекции по нейроинформатике. Часть 2, с.119–179.
12. Нечаев Ю.И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011.
13. Пайтген Х.-О., Рихтер П.Х. Красота фракталов. – М.: Мир, 1993.
14. Петров Ю.П. Неожиданное в математике и его связь в авариях и катастрофах последних лет. – Санкт-Петербург. Изд-во СПбГУ, 2002.

15. Пойа Дж. Математика и правдоподобные рассуждения. – М.: Наука, 1975.
16. Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф. – М.: Мир.1980.
17. Сизов В.Г. Об остойчивости судов, перевозящих сыпучие грузы // Судостроение. 1958. №6, с.7 – 11.
18. Синергетическая парадигма. Многообразие поисков и подходов. – М.: Прогресс – Традиция, 2000.
19. Системы искусственного интеллекта с интеллектуальных технологиях XXI века. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011.
20. Солодовников В.В., Тумаркин В.И. Теория сложности и проектирование систем управления. - М.: Наука, 1990.
21. Справочник по теории корабля. Т.2.- т Судостроение, 1985.
22. Федер Е. Фракталы. - М.: Мир,1991.
23. Хакен Г. Синергетика: иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. – М.: Мир, 1985.
24. Хаяси Т. Нелинейные колебания в физических системах. – М.: Мир, 1973.
25. Barnsley M.F. Fractals Ewerywhere. Academic Press.1988.
26. Judd K., Mees A. On Selecting Models for Nonlinear Time Series // Physica D. 82: 426-444. 1995.
27. Thom R. Catastrophe theory: Its present state and future perspectives. - Dynamical systems. Warwick. 1974. – Berlin – Heidelberg – New York Springer Verlag. 1-75. p.p.366 – 372. Lecture Notes Math. V. 468.
28. Wing H., Chen G. Necessary conditions for some typical fuzzy systems as universal approximators. Automatica. 1997. Vol.33.№7, p.p.1333 – 1338.
29. Zadeh L. Fuzzy logic, neural networks and soft computing //Commutation on the ASM-1994. Vol.37. №3, p.p.77 – 84.