

# Функции интерпретации нестационарной динамики подводных объектов

Ю. И. Нечаев<sup>1</sup>, Д. В. Никущенко

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
<sup>1</sup>nechaev@mail.ifmo.ru

**Аннотация.** Обсуждается построение функций интерпретации динамики подводных объектов (ПО) в нестационарной среде на основе концепции мягких вычислений (Soft Computing) и выявления «скрытых» знаний (Data Mining). Процедуры интерпретации реализованы в функциональных пространствах современной теории катастроф (СТК). Интеллектуальная поддержка (ИП) и алгоритмы интерпретации эволюционной динамики ПО осуществлена в блоке моделирования мультифункционального программного комплекса (МПК) в режиме экстренных вычислений (Urgent Computing – UC).

**Ключевые слова:** функции интерпретации; подводный объект; нестационарная динамика; современная теория катастроф; экстренные вычисления

## I. ВВЕДЕНИЕ

Концептуальный базис функций интерпретации пространств поведения и управления СТК предусматривает построение формального аппарата синтеза моделей эволюционной динамики ПО и преобразования информации при интерпретации ситуаций на основе динамической модели СТК. Рассмотрим основные алгоритмы построения функций интерпретации в сложной динамической среде (рис. 1).

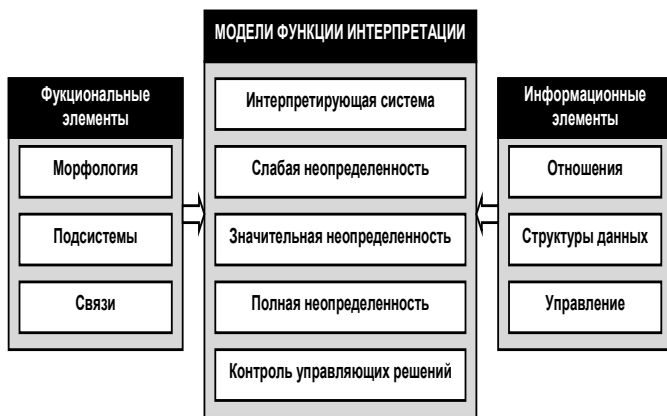


Рис. 1. Модели функций интерпретации эволюционной динамики ПО

Реализация стратегии построения функций интерпретации эволюционной динамики ПО связана с использованием следующих определений [2].

**Определение 1.** Динамическая модель СТК определяет функцию интерпретации множеств в пространстве управляющих переменных, характеризующих среду управления, интегрирующую динамику взаимодействия, внешнюю среду и структурные изменения в поведении ПО. При реализации управляющих воздействий нечеткая формальная система (НФС), определяющая функции интерпретации, может эволюционировать к различным состояниям в зависимости от особенностей внешней среды и динамики взаимодействия.

**Определение 2.** В процессе эволюции ПО в сложной динамической среде возникают состояния устойчивого и неустойчивого равновесия, определяемые множествами динамической модели СТК, исследование которых на основе функций интерпретации ведется в рамках принципа конкуренции в условиях неопределенности и неполноты исходной информации.

**Определение 3.** При недостаточной эффективности управляющих воздействий происходят резкие изменения в пространстве знаний НФС, характеризующем функции интерпретации при потере устойчивости и возникновении катастрофы в условиях значительных возмущений.

Моделирование нестационарной динамики ПО осуществляется на основе анализа иерархической структуры с использованием методов моделирования. Выделенные в этой структуре критериальный базис и элементарные подзадачи анализируются при разработке алгоритмов интерпретации.

## II. ФОРМАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ПОСТРОЕНИЯ ФУНКЦИЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Рассмотрим формальную модель процесса обработки информации при построении функций интерпретации при синтезе нелинейных нестационарных систем. Представим эту модель в виде элементов, определяющих информационную базу функции интерпретации нестационарной динамики ПО в пространствах поведения и управления СТК, в следующем виде [3]:

$$M(S) = \langle F_1(X, u), F_2(Y, Z), F_3(X, Q_1), F_4(X, Q_2), F_5(X, Q_1), F_6(X, Q_2), F_7(Q_3, Q_4), F_8(Q_3, Q_4), F_9(S) \rangle, \quad (1)$$

где  $F_1(X, u)$  — функция, определяющая структуру алгоритмов предварительной обработки информации  $X$ ;

$u$  – возмущающее воздействие;  $F_2(Y, Z)$  – функция, определяющая состав алгоритмов, обеспечивающих формирование из выходной информации  $Y$  элементов  $Z$ , определяющих состояние ПО;  $F_3(X, Q_1)$ ,  $F_4(X, Q_2)$  – функции, определяющие состав алгоритмов, реализующих вычисление статических  $Q_1$  и динамических  $Q_2$  информационных признаков с использованием полезной информации  $J$  (useful effective);  $F_5(X, Q_3)$ ,  $F_6(X, Q_4)$  – функции, определяющие состав алгоритмов, обеспечивающих вычисление статических  $Q_3$  и динамических  $Q_4$  информационных признаков с учетом геометрических характеристик системы;  $F_7(Q_1, Q_2)$ ,  $F_8(Q_3, Q_4)$  – функции, определяющие алгоритмы вычисления диагностических признаков с использованием нормативных значений и критериальных уравнений;  $Q_{CR} = (Q_{CR})^s \cup (Q_{CR})^d$ ;  $F_9(S)$  – функция идентификации текущей ситуации  $S$  с помощью системы  $F(S)$ .

Преобразование информации эволюционной динамики ПО при построении функций интерпретации имеет вид:

$$\{R_1^n(t) \times R_1^r(t) \rightarrow R_1(t), \dots, R_m^n(t) \times R_m^r(t) \rightarrow R_m(t)\}, \quad (2)$$

где  $\{R_1^n(t), \dots, R_m^n(t)\}$  и  $\{R_1^r(t), \dots, R_m^r(t)\}$  – пространства поведения и управления, определяющие результат преобразования информации, на основании которого осуществляется реконструкция модели;  $j=1, \dots, m$  – последовательность эволюции системы.

Задача построения функции интерпретации эволюционной динамики ПЛ рассматривается как поиск экстремума критерия  $C_R(F(M))$ , обеспечивающего выделение необходимого класса моделей  $F(M)$  на множестве  $\Phi(M)$  математических описаний МПК:

$$F(M)^* = \arg \min_{F(M) \in \Phi(M)} C_R(G(M)). \quad (3)$$

Условие (3) формулирует задачу выбора, для решения которой необходимо задать вид и объем исходной информации, класс базисных функций (операторов) из которых формируется множество  $\Phi(M)$ , определить способ генерации моделей  $F(M)$  вместе с методом оценивания параметров, выбрать критерий сравнения моделей, указать метод оптимизации  $C_R(F(M))$ . Имеющаяся выборка данных  $[X, Y]$ , содержит результаты  $n$  наблюдений входных переменных  $m$  и результаты выхода  $u$ . Исходные данные представляются в виде матрицы  $X$  и вектора  $Y$ :

$$\begin{aligned} X &= [x_{ij}], i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m, \\ Y &= [y_1, \dots, y_m]^T, (n \geq m). \end{aligned} \quad (4)$$

Особый интерес при реализации моделей (1) – (4) представляют методы анализа с помощью быстродействующих вычислительных средств [3], [4].

### III. МУЛЬТИМОДЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ПОСТРОЕНИЯ ФУНКЦИЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Мультимодельная среда [3], обеспечивающая контроль текущих ситуаций эволюционной динамики ПО,

представляет собой иерархическую структуру. На каждом уровне иерархии вводится описание последовательности операций в терминах пространств состояний и ситуаций в соответствии со следующими определениями:

**Определение 1.** Пространство *состояний*  $X$  критической ситуации включает в себя тип и число переменных и параметров состояния  $\Omega$ , функцию отображения  $f: X \times \Omega \rightarrow R$ , а также описание состояний, соответствующих данному уровню иерархии.

**Определение 2.** Пространство *ситуации* системы взаимодействия – множество элементов на данном уровне иерархии, характеризующееся параметрами ситуации и особенностями динамики взаимодействия при заданном уровне внешних возмущений.

**Определение 3.** Математическое описание динамики взаимодействия в пространстве ситуаций включает следующие компоненты: множество допустимых входов  $U$  и выходов  $Y$ , множество состояний  $Q$ , функцию перехода  $\lambda: Q \times U \rightarrow Q$  и функцию выхода  $\gamma: Q \times U \rightarrow Y$ .

Приведенные определения позволяют сформулировать основную теорему интерпретации поведения ПО в критической ситуации на основе динамической модели СТК:

**Теорема 1.** Динамика критической ситуации в пространстве состояний характеризуется функцией интерпретации, определяющей области притяжения и управляющие решения в процессе эволюции ПО под воздействием внешних возмущений.

Рассмотрим интерпретацию этой теоремы. Движение ПО в процессе эволюции в пространстве состояний связано с понятиями *направленности* и *сходимости*. В динамической модели СТК рассматриваются два класса сходимости:  $G_1$  – сходимость к целевому аттрактору и  $G_2$  – сходимость, определяющая потерю устойчивости и возникновение катастрофы.

На рис. 2 представлена обобщенная структура дерева ИП, обеспечивающая процедуры интерпретации эволюционной динамики сложных систем.

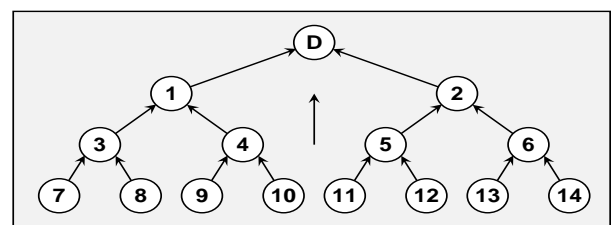


Рис. 2. Общая модель дерева решений при ИП процедур эволюционной динамики

Ветви дерева отображают следующие решения: 1 и 2 – функции интерпретации множеств поведения и управления динамической теории катастроф; 3 – 6 – конкурирующие вычислительные технологии при выборе предпочтительного решения в задачах идентификации, аппроксимации, прогноза и управления; 7 – нечеткие алгоритмы многокритериальной оптимизации; 8 – 10

нейросетевые алгоритмы идентификации, аппроксимации и прогноза, 11 и 12 – алгоритмы генерации решений и анализа альтернатив; 13 и 14 – нейроэволюционные алгоритмы интерпретации решений и графического отображения результатов моделирования.

#### IV. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИЙ ИТЕРПРЕТАЦИИ В ЭВОЛЮИОНИРУЮЩЕЙ СРЕДЕ

1. *Функция параметрической интерпретации.* Подход к построению функций интерпретации поведения ПО основан на вычислении отклонения между откликом исследуемой модели и эталонными откликами [3]. Отклик модели строится на основе данных моделирования, а эталонный отклик – по результатам динамических измерений. Настройка параметров модели осуществляется таким образом, чтобы расхождение данных для текущей и эталонной моделей было минимальным. Эталонный отклик представляется в размытом, нечетком виде, а отклики модели – в виде точечной оценки на основе процедуры дефазификации.

2. *Функция интерпретации фрактальных структур.* Построение функции ведется на основе концептуального базиса СТК. Эволюция ПО интерпретируется в виде двух предельных случаев взаимодействия с использованием фрактальной геометрии и управляющих воздействий (рис. 3) [2].

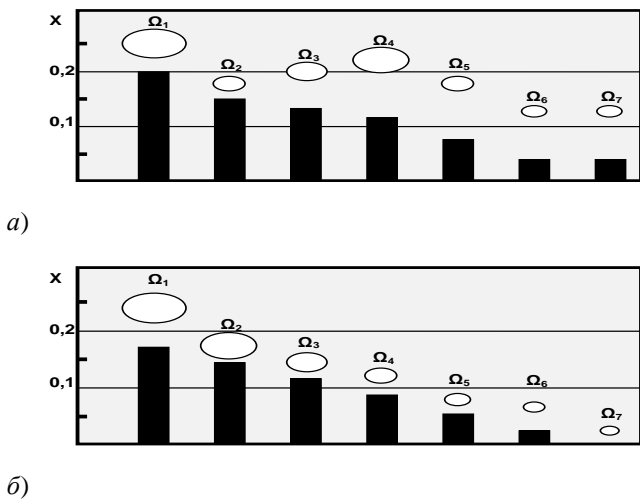


Рис. 3. Интерпретация поведения ПО: а – движение к целевому аттрактору; б – потеря устойчивости (возникновение катастрофы)

Здесь представлена топологическая картина изменения определяющего параметра  $X$  области  $W(t)$ , описывающей взаимодействие в процессе эволюции ПО. Геометрические образы  $\Omega$  имеют вид эллипсов с точками 1 – 7, а столбики характеризуют результат функционирования системы ИП. Цифры по оси ординат (метры) определяют достижимый уровень изменения  $X$ .

Из рис. 3а следует, что на стадии движения ПО к целевому аттрактору рассматриваемая система эволюционирует в соответствии с принятой стратегией управления. Однако в ситуации на рис. 3б система

деградирует, происходит потеря устойчивости движения (возникновение катастрофы), а проведенных мероприятий оказывается недостаточно для обеспечения безопасности ПО в рассматриваемой ситуации.

3. *Функции интерпретации при анализе альтернатив.* Условия выбора альтернатив [3] выполняются с использованием класса  $\Omega_{PN}^*$  Парето-оптимальных (Р-альтернатив), определяемых как решение семейства задач.

$$\max(\varepsilon P(\{A[\omega]\}), (1-\varepsilon)N(\{A[\omega]\})) \rightarrow \min, 0 \leq \varepsilon \leq 1. \quad (5)$$

Функция интерпретации структуры  $\Omega_{PN}^*$  реализуется при условии: если

$$\max(\{P^{A[d]}(\{1\}), P^{A[d]}(\{0\})\}) = 1, \quad (6)$$

то  $P^{A[d]}(T) \geq P^{A[d]}(T)$  для всех  $T \in 2^{(0,1)}$  и класс устроен следующим образом:

$$\max_{\omega \in \Omega} P^{A[d]}(\{A[\omega]\}) < 1, \quad (7)$$

причем класс  $\Omega_{PN}^*$  совпадает с классом Р-оптимальных альтернатив  $\Omega_P^*$ . Если

$$\max_{\omega \in \Omega} P^{A[d]}(\{A[\omega]\}) = 1, \quad (8)$$

то класс  $\Omega_{PN}^*$  совпадает с классом N-оптимальных альтернатив  $\Omega_N^*$ .

В этих выражениях Р-оптимальная  $\omega^* \in \Omega$  альтернатива по *возможности* и N-оптимальная  $\omega^* \in \Omega$  альтернатива по *необходимости* определяются соотношениями:

$$P(A[\omega^*] = 1) = \sup_{\omega \in \Omega} P(A[\omega] = 1); \quad (9)$$

$$N(A[\omega^*] = 1) = \sup_{\omega \in \Omega} N(A[\omega] = 1). \quad (10)$$

На основании результатов моделирования проведена качественная оценка эффективности алгоритмов ММК. Анализ выполнен для стандартных ситуаций в соответствии с разработанной стратегией вычислительного эксперимента.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе разработанных концептуальных решений сформулируем стратегию выбора модели эволюционной динамики ПО в среде УС [4].

1. При незначительной неопределенности функции интерпретации реализуются с использованием моделей динамики ПО в функциональных пространствах СТК [2].

2. При значительной неопределенности используются функции интерпретации модифицированных моделей в рамках концепции «климатического спектра» [2].

3. В условиях полной неопределенности построение функции интерпретации ведется на основе методов решения обратных задач функционала действия [3].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Барсегян А.А., Куприянов М.С. Степаненко В.В., Холод И.И. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining. Санкт-Петербург. БХВ-Петербург, 2004. 336 с.
- [2] Нечаев Ю.И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений. Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011. 392 с.
- [3] Нечаев Ю.И. Современные проблемы информатики и вычислительной техники. Санкт-Петербург: Арт-Экспресс: 2018. 384 с.
- [4] Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007. <http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>