

# Нейронечеткое моделирование динамики судна в условиях ограниченного фарватера

Ю. И. Нечаев\*, А. Л. Мелконян, М. В. Чуклин

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Санкт-Петербург, Россия

\*nechaev@mail.ifmo.ru

**Аннотация.** Рассматриваются результаты нейронечеткого моделирования динамики судна при движении в условиях ограниченного фарватера на основе современной теории катастроф (СТК). Рельеф дна представляется в виде нестационарного поля различной интенсивности. Взаимодействие судна с нестационарным полем реализовано на базе данных динамических измерений с помощью матрицы нечеткого управления и нейронечеткой сети с учетом волновых возмущений. Анализ проведен на основе способа контроля, изложенного в патенте №2147540.

**Ключевые слова:** нейронечеткое моделирование; динамика судна; ограниченный фарватер

## I. ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваемая модель динамики судна в условиях ограниченного фарватера – это набор современных подходов и инструментария, интегрированных решений в рамках СТК, состоящих из разных программных модулей и объединенных одним общим решением. Эта модель определяет совокупность интеллектуальных модулей, формирующих управленческие решения при контроле динамики судна в условиях сложного рельефа дна, который представляется в виде нестационарного поля.

Нейронечеткое (Neural Fuzzy) NE-моделирование реализуется с помощью матрицы нечеткого управления и нейронечеткой сети, формируемых в рамках концепции эволюционной динамики судна в нестационарной среде на основе стратегии экстренных вычислений [1]–[5]. Функциональная схема взаимодействия судна в условиях ограниченного фарватера реализует стратегию многорежимного управления в исследуемых ситуациях (рис. 1).

Поведение судна как многорежимной динамической системы описывается вектором состояния  $x = \{x_i\} (i=1, \dots, n)$ . Внешние возмущения характеризуются вектором  $W = \{W_k\} (k=1, \dots, K)$ , а выходные координаты системы  $y = \{y_j\} (j=1, \dots, m)$  представляют собой регулируемые величины, зависящие от управляющих воздействий  $U = \{u_q\} (q=1, \dots, Q)$ . Многофункциональный программный комплекс (МПК) оперативного контроля и генерации практических рекомендаций  $R_1, \dots, R_n$  по управлению судном обеспечивает ND-моделирование в режиме экстренных (Urgent Computing – UC) [5].

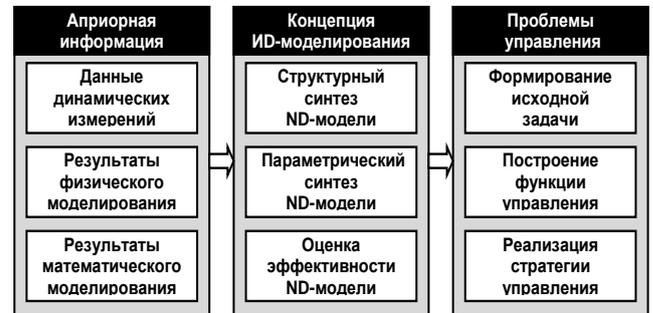


Рис. 1. Функциональная модель, реализующая стратегию управления

## II. СТРАТЕГИЯ МНОГОРЕЖИМНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Исходная информация поступает от датчиков измерительной системы в дискретные моменты времени  $1, 2, \dots, t$  и формирует информационный вектор  $J$ :

$$J = (\tilde{O}_1, \dots, \tilde{O}_N, t \in [t_0, T]), \quad (1)$$

где  $X_1, \dots, X_N$  — параметры, определяющие состояние судна.

На основе данных о параметрах  $X_1, \dots, X_N$  проводится анализ ситуации и ведется построение прогнозирующей функции, наилучшим образом отображающей тенденции в изменении компонент информационного вектора (1). Задавая предельные значения  $X_1^*, \dots, X_N^*$  характеристик, можно установить интервал времени  $\tau = \tau_{\min}$ , в пределах которого обеспечиваются условия безопасности:

$$\tau = \tau_{\min} \text{ и } \tilde{O}_1(t) \leq \tilde{O}_1^* |, \dots, X_N(t) \leq X_N^* |. \quad (2)$$

Формальное представление системы NE-моделирования приведено на рис.2. Система содержит три основных блока – функциональных компонентов СТК, эволюции и геометрической интерпретации. Блок СТК обеспечивает взаимодействие оператора МПК при геометрической и аналитической интерпретации эволюции системы путем формирования исходных данных для решения задач, сформулированных на рис.1. В процессе интерактивного взаимодействия оператор управляет процессом функционирования системы NE-моделирования и отображением полученных результатов.



Рис. 2. Модель динамики судна в условиях мелководья на основе СТК

Разработанная стратегия НЕ-моделирования эволюции судна на ограниченном фарватере обеспечивает реализацию методов адаптивного управления с использованием нечеткой формальной системы (НФС) [1],[2]. Как следует из приведенных данных, стратегические решения по управлению судном в нестационарной среде не являются постоянными, а совершенствуются по мере развития техники моделирования и данных о нестационарном волновом поле и рельефе дна.

### III. СТРАТЕГИЯ НЕ-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Общая стратегия НЕ-моделирования в задачах управления движением судна определена как задача построения непрерывной зависимости с заданными свойствами по дискретному набору данных измерений [2].

Формально такая задача сводится к поиску отображения:

$$F : X^n \rightarrow Y^m, \quad (3)$$

определяемого для дискретного набора данных, как вектора размерностью  $n$  входных данных  $x \in X^n \subset R^n$ , и в  $m$ -мерном пространстве параметров модели  $y \in Y^m \subset R^m$ . Это отображение должно удовлетворять обобщенному критерию качества аппроксимации

$$E : Y^m \rightarrow R, \quad (4)$$

Критерий (4) включает в себя как требуемую точность аппроксимации  $\varepsilon > 0$  (минимизацию ошибки) и дополнительные требования к внешнему виду или поведению модели за пределами области данных. Задача оптимизации определяется как поиск оптимального набора параметров – значений вектора параметров оптимизируемой модели, обеспечивающего минимальное расхождение от дискретного набора данных.

В качестве числовой меры точности НЕ-модели использована нормированная среднеквадратическая ошибка

$$S_N = \left[ \sum_{i=1}^N (y_i - y_i^*)^2 / (N-1) \right] / (y_{\max}^* - y_{\min}^*), \quad (5)$$

где  $(y_{\max}^* - y_{\min}^*)$  – размах наблюдения величины выхода сети  $y^*$ .

Таким образом, реализация стратегии НЕ-моделирования при контроле динамики судна на ограниченном фарватере связана с решением задач, связанных с выбором топологии и обучением сети на основе данных динамических измерений и волновых возмущений.

Задача НЕ-моделирования динамики судна на ограниченном фарватере сводится к построению ситуационной модели с динамически изменяющимся классом стратегий и управлением сценариями на основе модели типа «сущность – связь» [2]:

$$\text{Con}(C_1, \dots, C_k) = \{(S_1, \dots, S_m), (W_1, \dots, W_n), (R_1, \dots, R_m)\}. \quad (6)$$

Здесь:  $S$  – множество сценариев;  $W$  – множество вариантов, описываемых информационной моделью;  $R$  – множество выводов (результаты моделирования сценария по каждому варианту);  $C$  – множество связей семантической сети кортежа  $\{S, W, R\}$ ; эти множества содержат только ссылки на экземпляры множеств  $(S, W, R)$ .

Процедуры НЕ-моделирования реализованы на основе нейронечеткой аппроксимации [2] (рис. 4).

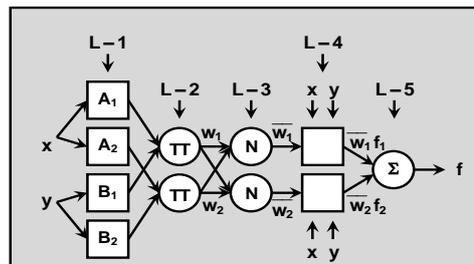


Рис. 3. Нейронечеткая сеть, реализующая механизм логического вывода

В приведенной НЕ-сети узлы, обозначенные кружочками, являются фиксированными, а узлы в виде квадратиков – адаптируемыми, т.е. их параметры могут настраиваться. Как видно из рис.3, функции нейронечеткой системы изменяются от узла к узлу и зависят от текущей ситуации. Нейроны первого слоя содержат ФП входных параметров, удовлетворяющих лингвистическому значению данного узла.

Динамическая визуализация нестационарного взаимодействия рассмотрена для трех типичных ситуаций: ситуация I предусматривала условие взаимодействия при слабой нестационарности рельефа дна, II – при значительной нестационарности и III – при воздействии нерегулярного волнения и значительной неопределенности рельефа дна (рис.4).

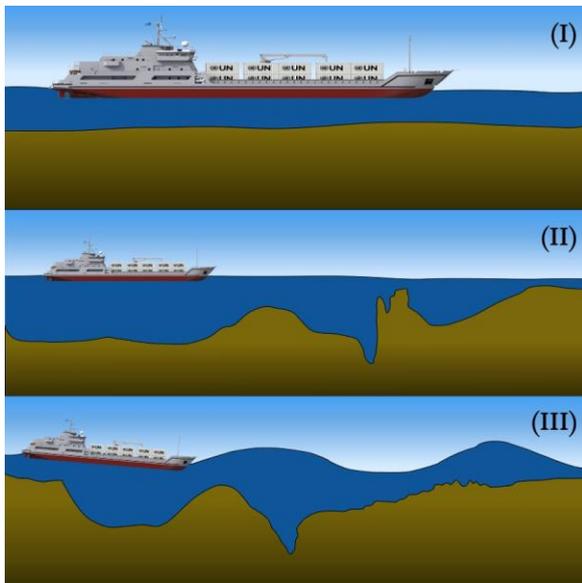


Рис. 4. Динамические картины взаимодействия в различных условиях формирования нестационарной среды

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ НЕ-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования приведены в табл. 1–3.

ТАБЛИЦА I Матрица оценок факторов  $X_1$  и  $X_2$  при возникновении удара при незначительном рельефе дна (фактор  $X_3$ )

X	$X_1$	$X_2$	$X_3$
$f_1F_1$	0.276	1.806	1
$f_2F_2$	0.438	2.069	0
$f_3F_3$	0.449	2.086	0
$f_4F_4$	0.526	2.215	0
$f_5F_5$	0.458	2.102	0
$f_6F_6$	0.539	2.237	0
$f_7F_7$	0.438	2.068	0

ТАБЛИЦА II Матрица оценок факторов  $X_1$  и  $X_2$  при возникновении удара при значительном рельефе дна (фактор  $X_4$ )

X	$X_1$	$X_2$	$X_3$
$f_1F_1$	0.307	1.855	1
$f_2F_2$	0.270	1.797	0
$f_3F_3$	0.274	1.802	1
$f_4F_4$	-0.013	1.193	1
$f_5F_5$	0.222	1.721	0
$f_6F_6$	0.476	2.131	0
$f_7F_7$	0.372	3.931	0

ТАБЛИЦА III Матрица оценок факторов  $X_1$  и  $X_2$  при возникновении удара при значительном рельефе дна (фактор  $X_5$ )

X	$X_1$	$X_2$	$X_3$
$f_1F_1$	0.337	1.904	1
$f_2F_2$	0.723	2.561	0
$f_3F_3$	0.730	2.573	1
$f_4F_4$	0.051	1.459	1
$f_5F_5$	0.787	2.680	0
$f_6F_6$	0.715	2.546	1
$f_7F_7$	-1.394	-0.489	0

В табл. 4 представлены сравнительные данные, характеризующие случай возникновения дифферента при движении судна на ограниченном фарватере и волнении.

ТАБЛИЦА IV РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ УГЛА ДИФФЕРЕНТА В НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ СИТУАЦИЯХ

№ опыта	Нейросетевой алгоритм	Фактические данные
1	-0.047	-0.047
2	-6.24	-6.38
3	-1.81	-1.63
4	-6.67	-6.72
5	-4.95	-4.87

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенное исследование свидетельствует о больших возможностях практической реализации нейросетевых технологий в практических приложениях динамики судна. Разработанная в рамках сформулированного подхода модель нейросетевого моделирования позволяет расширить функциональные возможности системы контроля в условиях ограниченного фарватера. Повышение эффективности решения задачи достигается при реализации принципа конкуренции [2] в рамках концепции мягких вычислений [1].

#### 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] Нейрокомпьютеры в интеллектуальных технологиях XXI века. М.: Радиотехника, 2011. 352 с.
- [3] Нечаев Ю.И. Современные проблемы информатики и вычислительной техники. Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2018. 384 с.
- [4] Патент РФ № 2043271 от 10.09.95. «Способ оценки остойчивости судна» / Нечаев Ю.И.
- [5] Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007.