

Стратегические решения при интерпретации динамической непотопляемости

О. Н. Петров, А. А. Ратушная

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
petr_oleg@mail.ru

Аннотация. Обсуждаются результаты исследования динамической непотопляемости судна. Процедуры анализа и прогноза эволюции поведения аварийного судна реализованы на основе структурного синтеза данных и стратегии моделирования в условиях непрерывного изменений динамики судна и внешней среды. Принятые во внимание требования к адекватности имитационной модели позволили обеспечить оперативное управление и прогноз развития экстремальной ситуации в связи с ухудшением характеристик судна. Приведены результаты моделирования при различном уровне внешних возмущений.

Ключевые слова: динамическая непотопляемость; система реального времени; экстремальная ситуация

I. ВВЕДЕНИЕ

Концептуальный базис и стратегические решения обсуждаются применительно к функционированию бортовой интеллектуальной системы оперативного контроля динамической непотопляемости судов в штормовых условиях [1]–[5]. Функционирование интеллектуальной системы обеспечивается на основе программного комплекса интерпретации и управления на основе современной теории катастроф [1].

Тестирование динамической базы знаний интеллектуальной системы выполнено с использованием реальных данных по аварии РТМ «Тукал», развитие которой происходило при движении судна на нерегулярном волнении [3]. Последовательность преобразования информации при контроле экстремальной ситуации в процессе развития аварии представлена на рис. 1.

Представленный процесс обработки информации реализуется в виде последовательности процедур, содержащих идентификацию, аппроксимацию и прогноз развития аварийной ситуации в рамках парадигмы [2]. Сжатие информации и анализ обрабатываемых сигналов с датчиков измерительного комплекса интеллектуальной системы осуществляется в режиме экстренных вычислений (Urgent Computing – UC [5]), что позволяет принимать во внимания условия непрерывного изменения динамики судна и внешней среды.



Рис. 1. Поток информации при оперативном контроле динамики аварийного судна

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ СИТУАЦИИ

Рассмотрим постановку задачи интерпретации исследуемой экстремальной ситуации. Представим формальное множество эволюционной динамики аварийного судна в виде последовательности, определяющей *поле выбора* в виде функции согласования [1]–[3].

$$W(t_0) \rightarrow W^*(t) \xrightarrow{\alpha^*} W(t_i) \dots \xrightarrow{\beta^*} \dots W(t_n) \quad (1)$$

где $W(t_0)$ – исходная система, определяющая состояние среды взаимодействия; $W^*(t)$ – факторизованная система, реализующая взаимодействие в пространстве поведения; $W(t_i)$ и $W(t_n)$ – системы, построенные в результате использования интерпретирующих алгоритмов; α^* – преобразование, определяющее включение системы $W^*(t)$ в $W(t_i)$; β^* – система канонических преобразований,

представленных в виде отображения информации на интервале реализации $[t_0, t_n]$.

Состояние аварийного судна в момент времени t_0 полностью определяется начальным состоянием $S(t_0)$, входным воздействием $x(t)$, управляющим воздействием $u(t)$, характеристиками судна $h(t)$ и воздействиями внешней среды $w(t)$ за промежуток времени $t^* - t_0$ (где t^* – текущее состояние во время развития аварии) с помощью уравнений динамики, преобразованных к виду:

$$S(t) = f(S(t_0), x(\tau), u(\tau), w(\tau), h(\tau)), \tau \in [t_0, t]; \quad (2)$$

$$y(t) = g(S(t), t), \quad (3)$$

Уравнение динамики по начальному состоянию $S(t_0)$ и переменным x, u, w, h определяет вектор-функцию $S(t)$, а уравнение наблюдения – по полученному значению состояний $S(t)$ – переменные на выходе подсистемы $y(t)$. Таким образом, цепочка уравнений объекта «вход – состояния – выход» позволяет определить характеристики подсистемы:

$$y(t) = f[(g(S(t_0), x(t), u(t), w(t), h(t))), \quad (4)$$

а под математической моделью реальной интерпретирующей системы следует понимать конечное подмножество исследуемых переменных $\{x(t), u(t), w(t), h(t)\}$ совместно со связями между ними и выходной характеристикой $y(t)$.

III. АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ СИТУАЦИИ

Практическое применение принципа адаптивного резонанса при функционировании нечеткой формальной системы (НФС) связано с реализацией определенных стратегий анализа текущей ситуации, интерпретация которой осуществляется в соответствии со следующими утверждениями [2].

– Если существует возможность реализации операций логического вывода на базе имеющейся системы знаний, то класс идентифицируемой ситуации рассматривается как образ, приводящий к возможности реализации стандартной ситуации, описываемой в виде одного или группы правил нечеткой системы. Поступивший на вход нечеткой системы входной вектор рассматривается как «образ», приводящий к возникновению «адаптивного резонанса» в системе, приводящего к выводу «стабильного» решения.

– Если имеющаяся система знаний не содержит логических правил, вступающих в «адаптивный резонанс» с входным вектором, определяющим класс ситуации, то текущая ситуация рассматривается как нестандартная (нештатная). На основе «пластичного» решения о появлении нестандартной ситуации формируется новый

входной образ (ситуация) и база знаний пополняется правилом, отображающим динамику взаимодействия объекта с внешней средой в рассматриваемой ситуации.

– Если процедуры, реализуемые на основе приведенных утверждений, не приводят к желаемому результату, то осуществляется поиск и модификация логического правила, имеющего наибольшее сходство с текущей информацией, представленной входным вектором. При реализации процедуры модификации осуществляется «подстройка» исходных значений функций принадлежности выделенного логического правила с учетом особенностей нештатной ситуации.

Рассмотренный подход был использован при интерпретации исследуемой ситуации с учетом структуризации нечетких знаний в рамках НФС. Для обеспечения функционирования нечеткой базы знаний на основе принципа адаптивного резонанса, в соответствии с приведенными утверждениями была разработана процедура эволюционной стратегии контроля динамической непотопляемости в условиях неопределенности.

IV. ИНТЕГРИРОВАННАЯ СРЕДА ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕПОТОПЛЯЕМОСТИ

Интегрированная среда моделирования и визуализации динамической непотопляемости содержит оценку компонент моделей системы ППР, математическое моделирование текущей ситуации, выработку практических рекомендаций, анализ альтернатив и принятие решений. Интеграция этих компонент осуществляется с использованием функциональных элементов:

$$\Phi(U) \cup \Phi(R) \cup \Phi(S) \cup \Phi(D), \quad (5)$$

где $\Phi(U)$ – функция управления вычислениями и моделированием; $\Phi(R)$ – функция, накладывающая ограничения на интерпретирующий модуль; $\Phi(S)$ – функция предметной области динамической непотопляемости; $\Phi(D)$ – функция оперативных данных по выполняемым вычислениям и моделированию.

Формализованное ядро управления моделированием и визуализацией динамической непотопляемости реализуется в рамках нечеткого логического базиса. Фундаментальной основой такой интерпретации является концепция нечетких целей и ограничений в рамках НФС. Повышение эффективности функционирования процедурной компоненты динамической базы знаний программного комплекса достигается за счет использования принципа конкуренции и формализации процесса обработки нечеткой информации в высокопроизводительной вычислительной среде. Другими принципами повышения эффективности ИС являются принцип открытости, принцип сложности и принцип нелинейной самоорганизации [1]. Реализация этих принципов осуществляется в рамках концепции мягких

вычислений, интегрирующей нечеткую логику, теорию ИНС и генетический алгоритм.

Задача прогнозирования поведения аварийного судна в рамках концепции динамической непотопляемости представляет собой цепочку преобразований:

$$\begin{aligned} X_1(T, S) &\Rightarrow Y_1(Out), \dots, \\ X_n(T, S) &\Rightarrow Y_n(Out), \end{aligned} \quad (6)$$

где компоненты $X_1(T, S), \dots, X_n(T, S)$ определяют функции интерпретации на каждом шаге выполнения операции интерпретации и управления динамической теории катастроф с использованием функции управления, а $Y_1(Out), \dots, Y_n(Out)$ – результаты прогноза исследуемой характеристики системы.

V. ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Математическая модель, описывающая динамику аварийного судна с учетом колебаний жидкости в затопленных отсеках, имеет вид:

$$\begin{aligned} (J_x + \mu_{\theta\theta})\theta'' + M_R(\theta') + M(\theta, \varphi, t) - \\ - \rho \sum_{m=1}^{\infty} (\delta_m q_m'' - g\beta_m q_m) &= M_x(t); \\ (D/g + \mu_{\eta\eta})\eta'' + M_R(\eta') - \rho \sum_{m=1}^{\infty} \beta_m q_m'' &= P(t); \\ (J_y + \mu_{\psi\psi})\psi'' + M_R(\psi') + DH\psi &= F_{\psi}(t); \\ q_1'' - g\lambda_1 q_1 + \delta_1 \lambda_1 \theta'' + \beta_1 \lambda_1 \eta'' - g\beta_1 \lambda_1 \theta &= 0; \\ \dots \\ q_m'' - g\lambda_m q_m + \delta_m \lambda_m \theta'' + \beta_m \lambda_m \eta'' - g\beta_m \lambda_m \theta &= 0; \end{aligned} \quad (7)$$

где θ, η, ψ – угловые и линейные перемещения при бортовой, поперечно-горизонтальной и килевой качке; $M(t), F_{\zeta}(t), F_{\psi}(t)$ – возмущающие силы и моменты; остальные обозначения соответствуют принятым в исследованиях динамики аварийного судна на волнении [1], [2], [4].

Наиболее сложной функцией в системе (7) является восстанавливающая компонента, входящая в дифференциальное уравнение бортовой качки и отличающийся существенной нелинейностью, сложностью и многозначностью. Непрерывно изменяясь во времени и пространстве, эта функция в значительной степени определяет результат интегрирования при изучении физических картин взаимодействия судна с внешней средой.

Математическое описание функции $M(\theta, \varphi, t)$ представляется в виде полинома, зависящего от параметров морского волнения, элементов судна, скорости

его движения и ориентации относительно генерального направления бега волн [2]:

$$\begin{aligned} \Delta l_w(h_w / \lambda, \theta, \varphi) &= B[\Phi\left(\frac{h_w}{\lambda}, \theta, \varphi_k\right) + \sum_{m=1}^6 A_m f_m(\theta, \varphi_k) + \\ &+ \sum_{n=1}^8 B_n F_n(\theta, \varphi_k) + \sum_{p=1}^3 C_p E_p(\theta, \varphi_k)], \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} \Phi(h_w / \lambda, \theta, \varphi_k), \sum_{m=1}^6 A_m f_m(\theta, \varphi_k), \\ \sum_{n=1}^8 B_n F_n(\theta, \varphi_k), \sum_{p=1}^3 C_p E_p(\theta, \varphi_k) \end{aligned} \quad (9)$$

функции, характеризующие данные стандартной модели и суммы поправок на влияние линейных, квадратичных и кубических членов разложения ряда Тейлора на величину суммарного приращения плеча остойчивости, определяемого с учетом дифракционной и интерференционной составляющих при движении судна с произвольным курсовым углом на волнении [2].

Интерпретация динамики взаимодействия с использованием разработанной структуры нерегулярного волнения на основе концепции «климатического спектра» осуществлялась с учетом фактической информации о состоянии аварийного судна в процессе развития аварии.

Процедура оценки адекватности модели взаимодействия рассматривает в качестве меры отклонения функцию штрафа (неадекватности):

$$\Phi(Y, S) = \begin{cases} 0 & \text{при } Y \in S \\ \varphi(Y, S) & \text{при } Y \notin S \end{cases} \quad (6)$$

где $\varphi(Y, S)$ – функция, определяющая степень неадекватности в заданной среде взаимодействия.

Разработанная с учетом этих требований имитационная модель позволяет обеспечить контроль и прогноз развития экстремальной ситуации, связанной с ухудшением характеристик динамики аварийного судна.

VI. СИСТЕМА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ПРИ КОНТРОЛЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕПОТОПЛЯЕМОСТИ

Концепция организации контроля динамической непотопляемости в рамках принципа конкуренции позволяет обеспечить непрерывный контроль поведения аварийного судна в условиях нерегулярного волнения (рис. 2).

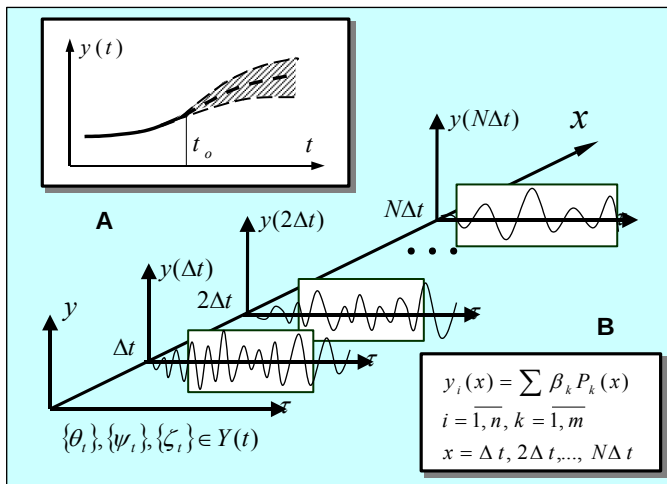


Рис. 2. Последовательность операций при контроле динамической непотопляемости

На рис.2 обозначено: A – данные измерений и прогнозируемые значения выходной характеристики (пунктир); B – общая структура адаптивной модели взаимодействия; $x = \Delta t, 2\Delta t, \dots, N\Delta t$ – текущее время развития ситуации; τ – интервал квазистационарности; $y(\Delta t), \dots, y(N\Delta t)$ – выходная характеристика.

При этом осуществляется оперативный контроль наиболее важных характеристик динамической системы (особенно равновесных углов крена и дифферента и параметров осадки). На основе этих данных обеспечивается прогноз времени нахождения судна в

экстремальной ситуации до наступления критического состояния.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проведенного исследования динамической непотопляемости реализованы процедуры анализа и прогноза развития аварийной ситуации при движении аварийного судна на нерегулярном волнении на основе структурного синтеза данных и стратегии интерпретации в условиях непрерывного изменения динамики судна и внешней среды. Реализация разработанной интеллектуальной технологии обеспечивается на основе системы реального времени и нейронной сети, моделирующая характеристики аварийного судна на основе принципов организации адаптивной компоненты базы знаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Нечаев Ю.И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений. Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011. 392 с.
- [2] Нечаев Ю.И., Петров О.Н. Непотопляемость судов: подход на основе современной теории катастроф. Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2013. 368 с.
- [3] Нечаев Ю.И. Современные проблемы информатики и вычислительной техники. Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2018. 384 с.
- [4] Справочник по теории корабля / Под ред. Я. О. Войткунского. Т. 2. Ленинград: Судостроение, 1985. 440 с.
- [5] Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007. [Электронный ресурс]: <<http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>>