

# ДВУХУРОВНЕВАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ГИБРИДНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ: ИНТЕГРАЦИЯ КЛАССИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ И НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ

**Аксенов Сергей Геннадьевич**

Доктор экономических наук, профессор, ФГБОУ ВО  
Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа  
beregpylya@mail.ru

## TWO-LEVEL INTELLIGENT HYBRID CONTROL SYSTEM: INTEGRATION OF CLASSICAL ALGORITHMS AND FUZZY LOGIC TO ENSURE STABILITY IN THE FACE OF UNCERTAINTY

**S. Aksenov**

*Summary.* In conditions of instability of management facilities and dynamic regulatory requirements, traditional methods are often ineffective in the absence of a complete a priori model. The paper proposes an approach to the design of a two-level intelligent hybrid system that combines classical algorithms with fuzzy logic to process uncertainty. A model is proposed that includes an analysis of the applicability of analytical approaches, the formation of an adaptive rule base, decision-making in conditions of partial incompleteness and dynamic correction of impacts. The stages of synthesis and verification are based on the principles of mutual adaptation, discrete series, and transformations. The integration of continuous dynamics and discrete event logic increases the adaptability, reliability, and stability of managing complex objects in a changing environment.

*Keywords:* hybrid control system, intelligent system, fuzzy logic, two-level architecture, uncertainty, real-time decision-making.

*Аннотация.* В условиях нестабильности объектов управления и динамических требований к регулированию традиционные методы часто неэффективны при отсутствии полной априорной модели. В работе предложен подход к проектированию двухуровневой интеллектуальной гибридной системы, объединяющей классические алгоритмы с нечёткой логикой для обработки неопределённости. Предложена модель, включающая анализ применимости аналитических подходов, формирование адаптивной базы правил, принятие решений в условиях частичной неполноты и динамическую коррекцию воздействий. Этапы синтеза и верификации основаны на принципах взаимной адаптации, дискретных рядов и трансформаций. Интеграция непрерывной динамики и дискретно-событийной логики повышает адаптивность, надёжность и устойчивость управления сложными объектами в изменяющейся среде.

*Ключевые слова:* гибридная система управления, интеллектуальная система, нечёткая логика, двухуровневая архитектура, неопределённость, принятие решений.

Нестабильность характеристик объекта управления и динамически изменяющиеся требования к качеству регулирования ограничивают эффективность традиционных методов, основанных на точных аналитических моделях, построение которых зачастую невозможно, что порождает неопределённость и снижает надёжность управления; для преодоления этих ограничений в работе рассматривается проектирование интеллектуализированных гибридных систем, синергетически объединяющих надёжность классических алгоритмов с адаптивностью методов искусственного интеллекта — подхода, признанного приоритетным в автоматизации сложных систем, в частности энергетических.

Состояние гибридной системы описывается парой: непрерывная динамика — системой ДУ, дискретная — передаточной функцией на конечном множестве состоя-

ний [2]; взаимодействие происходит в дискретные события, когда непрерывная траектория достигает заданных подмножеств. Формальное определение Визенхаузена (1966) сохранено в виде набора:

$$H_w = \langle M, \Omega, f, d, \omega, J \rangle \quad (1)$$

где  $M, \Omega$  — дискретные состояния и выходы;  $f$  — непрерывный переход;  $d$  — дискретный переход по  $J \subseteq P(R^n)$ ;  $\omega$  — отображение состояний в выходы.

Согласно (1), гибридное состояние задаётся парой  $(m, x) \in M \times R^n$ . Ключевое достоинство модели — способность описывать неоднородное поведение: плавную эволюцию непрерывной части  $x$  по дифференциальным уравнениям и резкие дискретные переходы, основанные на теоретико-множественных или экспертных правилах.

В работе [3] рассматривается класс гибридных систем, где дискретная компонента строится на экспертных знаниях. Динамика описывается уравнением:

$$S(t+1) = (\cup F_j(t) \cup \psi(\varphi(S(i), U(i), R_D, R_S))) \quad (2)$$

где  $\cup$  — объединение по  $j \leq t+1$  и  $i \leq t$ ,  $U(i)$  — управляющее воздействие;  $R_S$  и  $R_D$  — базы правил завершения режимов и переходов;  $\psi$  и  $\varphi$  — процедуры применения правил.

$R_S$  содержит знания о среде,  $R_D$  — действия исполнительных органов. Функционирование начинается с начального состояния; далее циклически: применение правил  $R_S$  до стабилизации ( $\psi(S)=S$ ), затем активация  $\varphi$  для перехода к  $S(t+1)$ . Цикл повторяется, обеспечивая адаптацию и непрерывное управление.

Ключевое достоинство модели (2) — адаптивность к изменениям среды и устойчивость к неполноте данных, позволяющая описывать динамику как аналитически, так и через экспертные правила; при этом интеллектуальная компонента выступает как семиотическая система распределённого интеллекта, обеспечивающая в реальном времени восприятие, интерпретацию и формирование управляющих воздействий на основе символьных и непрерывных знаний [5].

$$SS = \langle M, R(M), F(M), F(SS) \rangle \quad (3)$$

где  $M = \{M_i\}$  — множество логико-лингвистических моделей, реализующих интеллектуальные функции;  $R(M)$  — функция выбора необходимой модели (моделей) в текущей ситуации;  $F(M) = \{F(M_i)\}$  — множество функций модификации моделей;  $F(SS)$  — функция модификации системы  $SS$ , её базовых конструкций  $M, R(M), F(M)$ .

Модель (3) обеспечивает высокую адаптивность, распределённую и параллельную обработку, повышая быстродействие, отказоустойчивость и масштабируемость — свойства, важные для гибридных систем управления сложными объектами, такими как электрокамерные печи [6] или двигатели УПГ-50/6М на Мангышлаке [5,7]. Однако слабая интеграция классических и ИИ-компонентов подчёркивает необходимость разработки гибридных решений с эффективным взаимодействием парадигм.

На основе [7] предложен обобщённый алгоритм проектирования интеллектуальной гибридной системы, включающий:

1. Анализ объекта: оценка сложности, нестационарности и требований к качеству.
2. Синтез модели: схема, интеграция компонентов, алгоритмы и ПО.
3. Формирование базы знаний и экспертных правил с учётом динамики и критериев.

4. Разработка имитационной модели для исследования в различных режимах.
5. Моделирование подсистем — оценка автономности и тиражируемости.
6. Верификация по эталонным или экспериментальным данным.
7. Доработка модели.

Основу гибридизации составляют принципы взаимной адаптации, дискретных рядов и трансформаций; система включает два уровня и функционирует как единый механизм обработки и взаимодействия непрерывных, дискретных и символьных данных (рис. 1).



Рис. 1. Двухуровневая система обработки и взаимодействия данных

Первый уровень — классическое регулирование по моделям, второй — нечёткая логика; их результаты дополняют друг друга, а выходы классического регулятора адаптируют базу правил, чьё качество, определяемое экспертными знаниями, задаёт эффективность системы (рис. 2).

В работах [7] показано, что экспертные знания, используемые в нечёткой логике второго уровня, основаны на ключевых переменных классической теории автоматического управления: отклонении системы  $\theta$ , скорости изменения отклонения  $\dot{\theta}$ , интеграле отклонения  $\int \theta dt$  и ускорении  $\ddot{\theta}$ . Суть предложенного алгоритма решения задачи управления, представленная на рисунке 3.

Решение задачи управления основано на комбинации классического метода ( $l=1$ ) и эвристического ( $l=0$ ), с оценкой эффективности  $L=1/0$  — это позволяет системе динамически выбирать стратегию по текущему состоянию и результату.

Моделирование гибридной системы включает:

- 1) постановку задачи;
- 2) сбор данных от датчиков;
- 3) предварительную обработку и оценку применимости классического метода;
- 4) формирование базы знаний;



Рис. 2. Блок-схема гибридной системы управления

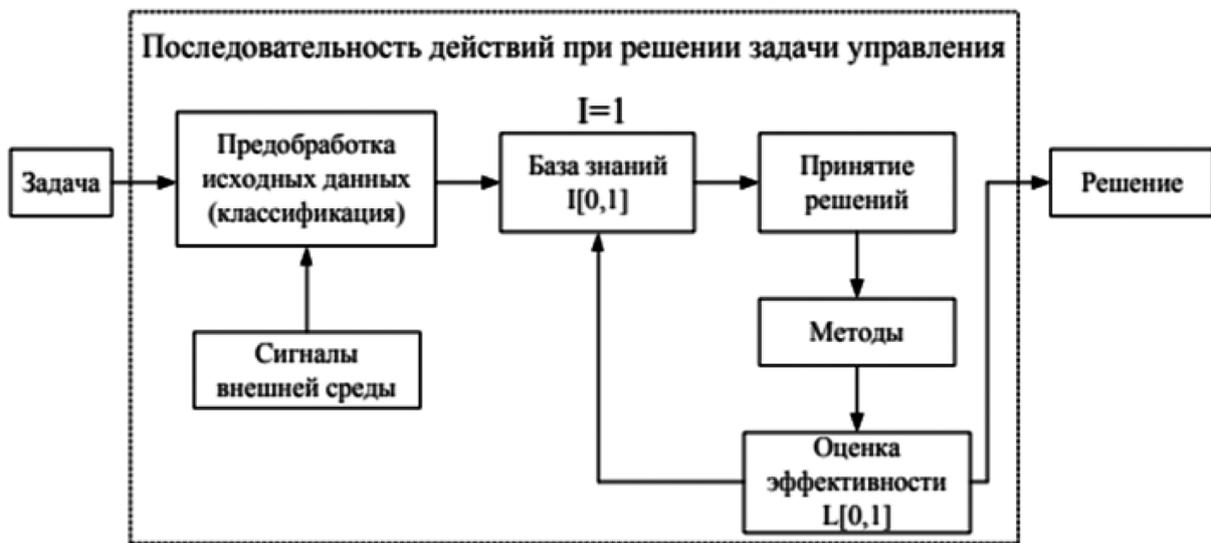


Рис. 3. Последовательность действий при решении задачи управления

- 5) выбор метода управления: при  $I=1$  — переход к п.6 (классическое управление), при  $I=0$  — к п.7 (нечёткое);
- 6) реализацию классического метода;
- 7) реализацию нечёткого метода;
- 8) оценку эффективности: при  $L=1$  — переход к п.10, при  $L=0$  — к п.9;
- 9) корректировку решения;
- 10) завершение алгоритма и вывод результата.

Рассмотренные этапы моделирования отражают структуру интеллектуальной гибридной системы управления, соответствуют её общепринятым определениям и формируют гибридный метод решения задач управления в условиях неопределённости.

В ходе исследований предложен структурированный подход к проектированию интеллектуальной гибридной системы управления, ориентированный на работу в условиях неопределённости. Определена двухуровневая архитектура системы, объединяющая обработку непрерывных сигналов на первом уровне и принятие решений на втором уровне. Моделирование реализовано через интеграцию аналитических моделей автоматического управления с эвристическими правилами, что позволяет компенсировать недостаток полной информации о параметрах объекта и среды.

---

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов С.Г. Управление организационными системами на основе интеллектуальных информационных технологий: методы и алгоритмы решения управленческих задач с применением искусственного интеллекта // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. — 2025. — №2/2. — С.42–47
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. — СПб.: Изд-во «Профессия», 2003. — 752 с.
3. Medsker L.R. Hybrid Intelligent Systems // International Journal of Computational Intelligence and Organizations. — 1996. — Vol. 1. — P. 10–20.
4. Yan H.H Power system security assessment using a hybrid expert system: neural network architecture / Proc. of IEEE. ISCS. New York. — 1992. — P. 1713–1716.
5. Вагин В.Н., Еремеев А.П. Реализация концепции распределенного ИИ и многоагентности в системах поддержки принятия решений на базе комплекса G2+GDA // Труды Междун. семинара «Распределённый искусственный интеллект и многоагентные системы — DIAMAS 97». — СПб., 1997.
6. Белоусов О.А. Гибридный регулятор для энергосберегающего управления электрокамерными печами // Промышленные контроллеры АСУ. — 2005. — № 7. — С. 29–30.
7. Funabashi M. Fuzzy and neural hybrid expert systems: synergetic AI // AI in Japan; IEEE Expert. — 1995. — P. 32–40.

---

© Аксенов Сергей Геннадьевич (beregrilya@mail.ru)  
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»