

УДК 004.92

doi: 10.15622/rcai.2025.034

## СТРУКТУРНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ ЭВОЛЮЦИОНИРУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ

А.И. Долгий (*a.dolgiy@vniias.ru*)

С.М. Ковалев (*ksm.1954@yandex.ru*)

АО «НИИАС», Москва

В статье представлен новый принцип организации структурно-чувствительного механизма функционирования нечетких эволюционирующих моделей (efTS), используемых в системах интеллектуального мониторинга. Предложенный механизм обеспечивает синхронизацию динамики системной модели с ходом технологического процесса (ТП) и позволяет на основе анализа происходящих в модели структурных изменений обнаруживать характерные особенности в поведении ТП. Достоинством “структурно-чувствительного” подхода к анализу информации является то, что структурные изменения, происходящие в efTS-модели под воздействием внешних изменений во входных данных, являются более выраженными и более четко проявляются в потоке данных, нежели плавные параметрические регуляции. Это существенно упрощает обнаружение целевых событий в потоке данных мониторинга. Для практического использования структурно-чувствительного подхода в алгоритмах мониторинга предложен формальный критерий структурной чувствительности efTS-модели. На основе приведенного критерия разработана алгоритмически простая процедура анализа структурной чувствительности системной модели с целью ее использования в алгоритмах аналитики данных и машинного обучения.

**Ключевые слова:** инкрементное обучение, структурная чувствительность, нечеткая эволюционирующая модель, интеллектуальный мониторинг.

### Введение

Интеллектуальный мониторинг (ИМ) технологических процессов (ТП) отличается от традиционных контрольно-диагностических и мониторинговых систем наличием компонента знаний, поддерживающего важную

функцию в системе ИМ, обеспечивающую возможность извлечения знаний об объекте мониторинга, их аккумуляцию и постоянное обновление в базе знаний (БЗ) мониторинговой системы. Наличие данного компонента в системе ИМ обеспечивает возможность решения широкого круга задач по прогнозированию поведения ТП при изменяющихся условиях функционирования, своевременному, обнаружению отклонений и нарушений в поведении ТП, предупреждению негативных вариантов его развития. Благодаря знаниям, сформированным в БЗ систем ИМ, удастся оптимизировать решение многих оперативно-диспетчерских задач по управлению ТП.

В рамках ИМ критически важным является решение специального класса FDD-задач [Zhao, 2020], составляющих основу характерного для современных систем управления функционала контроля и управления аномалиями (АЕМ-функционала). Реализация АЕМ-функционала позволяет выйти на создание принципиально нового класса высокоавтоматизированных систем управления без привлечения или с минимальным участием человеческого фактора. Однако, реализация АЕМ-функционала в системе ИМ сопряжена с рядом особенностей, которые выдвигают соответствующие требования к разработке базовых математических моделей для систем ИМ, среди которых ключевую роль играет модель нечеткой эволюционирующей системы.

## 1. Эволюционирующие нечеткие системы

Эволюционирующие нечеткие системы берут свое начало с новаторской работы Сугено и его коллег [Takagi, 1985], в которых авторами была представлена нечеткая модель Такаги-Сугено (TS-модель). Данный класс моделей основан на нечетких правилах вида:

$$, (1.1)$$

где  $\mathbf{x}$  –  $m$ -мерный вектор входных переменных;  
 $\mathbf{a}_i$  – лингвистические значения (нечеткие термы) переменных  $x_j$ ;  $\mu_{\mathbf{a}_i}(\mathbf{x})$  – функции принадлежности (ФП) нечетких термов  $\mathbf{a}_i$ ;  $y$  – целевая переменная состояния процесса.

Распространенной формой представления нечеткого правила (1.1) является выражение в форме нечеткой продукции:

$$, (1.2)$$

где  $\mathbf{a}_i$  – нечетко-логическая формула антецедента;  
 $y$  – целевая переменная, в качестве которой могут выступать класс состояний ТП или прогнозируемое значение параметра ТП, вычисляемое на основании линейной функции консеквента  $f(\mathbf{x})$ ;  $\&$  – оператор нечеткой конъюнкции;  $\rightarrow$  – оператор нечеткой импликации.

В практических задачах нечеткое правило (1.1) выступает в качестве формализованной модели эмпирического знания о связи ситуации принятия решения, представленной в антецеденте нечеткого правила в виде лингвистического описания, с решением, представленным в консеквенте нечеткого правила в виде значения целевой переменной .

Обобщенное описание ситуации принятия решений или состояния ТП, характеризует бесконечное множество схожих между собой ситуаций, имеющих одинаковые или близкие значения параметров . Для каждой конкретной ситуации, представленной в виде вектора параметров  $x$ , степень ее схожести с обобщенной ситуацией определяется на основе ФП антецедента:

$$\mu_{\text{ФП}}(x) = \min_{i=1, \dots, n} \mu_{\text{ФП}_i}(x_i) \quad (1.3)$$

Величина , называемая степенью активации нечеткого правила и обозначаемая в дальнейшем через  $\mu_{\text{ФП}}(x)$  либо  $\mu_{\text{ФП}_i}(x_i)$ , используется в механизме принятия решений TS-модели, основными элементами которого является БЗ и нечеткая схема вывода. Базу знаний TS-модели образует согласованная совокупность нечетких правил .

Нечеткая схема вывода предназначена для вычисления значений целевой переменной  $C$  в ситуации, представленной вектором параметров  $x$ , с использованием всех нечетких правил БЗ:

$$C = \max_{i=1, \dots, n} \mu_{\text{ФП}_i}(x_i) \quad (1.4)$$

где  $q$  – число нечетких правил в БЗ TS-модели;  $\mu_{\text{ФП}_i}(x_i)$  – значение функции консеквента нечеткого правила , вычисленное для вектора  $x$ ;  $\mu_{\text{ФП}_i}(x_i)$  – вклад нечеткого правила в результирующую оценку целевой переменной, вычисляемый на основании формулы:

$$\mu_{\text{ФП}_i}(x_i) = \min_{j=1, \dots, m} \mu_{\text{ФП}_{ij}}(x_{ij}) \quad (1.5)$$

– степень активации нечеткого правила в ситуации  $x$ , вычисляемая на основании (1.3)

В системе ИМ эволюционирующая efTS-модель базируется на TS-модели, элементы которой применительно к efTS приобретают следующую интерпретацию [Kovalev et al., 2020]:

- нечеткие правила , в БЗ efTS ассоциируются с состояниями ТП, при этом степень активации нечеткого правила является мерой соответствия текущего состояния ТП, представленного в потоке данных вектором параметров , ее лингвистическому описанию , представленному в антецеденте нечеткого правила;
- efTS выступает в качестве предиктивной модели, предназначенной для on-line прогнозирования целевой переменной во входном потоке данных , где первая компонента

представляет набор текущих значений параметров ТП, а вторая – значение целевой переменной, в качестве которой выступает вектор прогнозируемых оценок параметров, которые eFTS стремится на каждом шаге предсказать;

- eFTS является динамической системой, функционирование (эволюционирование) которой осуществляется в инкрементном (пошаговом) режиме под управлением потока данных и инкрементного механизма обучения путем реализации для каждого вновь поступившего образца данных схемы нечеткого вывода (1.3)-(1.5).

В процессе вывода вычисляются значения активаций нечетких правил. Поскольку, нечеткие правила ассоциируются с состояниями ТП, то очевидно, нечеткие правила, имеющие большие значения активаций, в большей мере соответствуют реальным состояниям, в которых находится ТП в текущий момент времени  $t$ . Поэтому, естественно связать состояние ТП с обобщенной ситуацией, указанной в antecedенте наиболее активного нечеткого правила, то есть:

$$(1.6)$$

где – состояние ТП, представленное лингвистическим описанием.

Соответствующее формальное определение состоянию ТП через активации нечетких правил будет дано несколько ниже.

## **2. Организация механизма online обучения нечеткой эволюционирующей модели**

Как отмечалось выше, эволюционирующая eFTS-модель, является динамической системой, функционирование которой осуществляется в пошаговом режиме под управлением потоковых данных. Это означает, что формирование, обучение и адаптация модели осуществляются синхронно с непрерывно поступающими на вход системной модели данными. Ключевую роль в этом процессе играет механизм online обучения на основе инкрементной субтрактивной кластеризации [Chiu, 1994].

Основная идея инкрементного обучения на основе субтрактивной кластеризации заключается в поэтапном формировании в пространстве параметров ТП групп (кластеров) близко расположенных точек и последующего извлечения из полученных кластеров нечетких правил для БЗ eFTS.

Информация для обучения eFTS накапливается в режиме online по мере поступления новых данных. Каждый новый образец данных характеризует новую информацию о текущем состоянии ТП, представленную точкой в пространстве числовых параметров. Предположим, что в течение интервала времени исследуемый ТП находится в одном из стабильных состояний. В этом случае накопленные за время данные образуют в

пространстве кластер схожих друг с другом точек , и все последующие образцы входных данных будут группироваться в этом же кластере, пока ТП будет находиться в прежнем состоянии . Изменение состояния ТП в момент сопровождается изменением числовых параметров вектора и появлением во входном потоке данных дрейфа концепции [Lu et. al., 2018]. В результате чего последующие данные , описывающие дальнейшее развитие ТП, начнут концентрироваться в другой области признакового пространства , т.е. образовывать новый кластер , характеризующий новое состояние ТП. Таким образом, по мере своего эволюционирования efTS-модель формирует в пространстве последовательность кластеров , которая, в свою очередь, индуцирует последовательность извлекаемых из них нечетких правил , образующих динамическую базу знаний эволюционирующей efTS-модели.

Поскольку активации нечетких правил характеризуют меру соответствия текущих параметров ТП состояниям ТП, указанным в антецедентах нечетких правил, представляется естественным связать состояния ТП с активациями нечетких правил динамической БЗ, формируемой efTS-моделью под управлением потока данных . Для увязки активаций нечетких правил с состояниями контролируемого процесса введем в рассмотрение понятие нечеткого множества “активных” нечетких правил.

**Определение 2.1.** Пусть – динамическая БЗ, сформированная к текущему моменту времени  $t$  в процессе эволюционирования efTS-модели под управлением потока данных . Нечетким множеством “активных” нечетких правил в момент  $t$  называется нечеткое множество:

$$, \quad (2.1)$$

где – активации нечетких правил, вычисляемые на основании (1.3). Понятие нечеткого множества активных правил положено в основу определения состояния ТП.

**Определение 2.2.** Пусть – поток входных данных, сопровождающий течение ТП, а – динамическая БЗ, сформированная в процессе эволюционирования efTS под управлением входного потока данных. Обобщенным состоянием ТП в текущий момент времени  $t$  называется нечеткое множество “активных” нечетких правил динамической базы знаний :

$$, \quad (2.2)$$

где – активации нечетких правил .

В контексте ИМ важное значение приобретают задачи выявления знаний о ходе ТП, которые тесно связаны с оценкой состояний и обнаружением фактов смены состояний. Здесь ключевую роль играет понятие пространства активаций нечетких правил.

**Определение 2.3.** Пространством активаций динамической базы знаний называется нечеткое множество активаций нечетких правил в  $q$ -мерном пространстве нечетких истинностных значений, образованном активациями нечетких правил базы знаний efTS-модели:

$$, (2.3)$$

где  $q$  – общее количество нечетких правил в БЗ efTS-модели, сформированной на момент времени  $t$ ;

### **3. Структурная чувствительность системной модели и принцип стабильной пластичности**

В рамках ИМ решается комплекс задач, связанных с оценкой состояний, идентификацией нарушений и прогнозированием поведения ТП. С этой целью efTS должна не только осуществлять прогнозирование целевых переменных, но и адекватно описывать динамику контролируемого процесса, проявляемую в смене его состояний.

При разработке такого класса моделей специалисты сталкиваются с рядом проблем, одной из которых является поиск баланса между стабильностью разрабатываемой модели, обеспечивающей ее оптимальность на достаточно длительном временном интервале, и пластичностью, обеспечивающей способность модели динамично реагировать на входные данные. Такой баланс в ряде работ назван дилеммой стабильной пластичности (stability-plasticity dilemma) [Abraham et al., 2005]. Для решения этой проблемы предлагается придать efTS принципиально новое качество, называемое структурной чувствительностью [Долгий и др., 2018].

*Структурная чувствительность характеризует способность efTS-модели на основе анализа происходящих в ней структурных изменений обнаруживать характерные особенности в поведении исследуемого процесса, вызванные сменой его состояний, появлением особых классов нештатных и/или целевых состояний, или появлением предшествующих им предикторных состояний.*

Структурная чувствительность efTS-модели является важным с практической точки зрения свойством эволюционирующей модели. Оно обуславливает возможность на основе анализа структурных изменений в БЗ efTS, выявлять существенные изменения в потоке данных и на этой основе обнаруживать характерные особенности в поведении

исследуемого ТП. Достоинством “структурно-чувствительного” подхода к анализу информации является то, что структурные изменения, происходящие в efTS-модели под воздействием внешних изменений во входных данных, являются более выраженными нежели плавные параметрические регуляции, вызванные воздействием тех же данных, что упрощает реализацию механизма принятия решений.

Для обеспечения структурной чувствительности необходимо организовать инкрементный механизм обучения так, чтобы efTS-модель была способна в пошаговом режиме соответствующим образом реагировать на изменения во входном потоке данных. То есть, при каждом поступлении нового образца данных, сопровождающего смену состояний ТП, база знаний efTS-модели должна обновляться путем появления новых нечетких правил или замены одной группы активных нечетких правил другой группой активных правил. Обновление БЗ efTS-модели осуществляется на основе инкрементного механизма структурной адаптации.

Структурная чувствительность efTS-модели обеспечивается инкрементным механизмом обучения [Dolgiy et. al., 2022]. На основании Определения 2.2 он должен быть организован таким образом, чтобы каждый новый образец данных, сопровождающий смену состояний ТП, одновременно приводил и к смене “активных” групп нечетких правил в БЗ efTS-модели. Поэтому, в основу анализа и формализации условия структурной чувствительности можно положить анализ условий нарушения равенства между нечеткими множествами “активных правил” [Бершт] в БЗ efTS-модели в переходные моменты времени.

*Критерий структурной чувствительности.* Пусть

– входной поток данных, сопровождающий течение ТП, а – динамическая БЗ efTS-модели, сформированная к моменту времени  $t$  в процессе эволюционирования efTS под управлением входных данных. Тогда, efTS-модель является структурно чувствительной к входному потоку данных, если и только если выполняется условие:

(3.1)

где – состояния ТП в смежные моменты времени ;  
– нечеткие множества “активных” правил в динамической БЗ efTS-модели в моменты времени .

Критерий структурной чувствительности означает, что смена состояний ТП быть обнаружена на основе анализа условия включения одного нечеткого множества в другое. Для этого воспользуемся эквивалентной формой представления критерия, вытекающей из свойств нечетких множеств []. Оно базируется на следующем Утверждении.

**Утверждение 3.1.** Эволюционирующая efTS-модель обладает структурной чувствительностью если и только если выполняется условие:

На основе Утверждения 3.1 можно предложить алгоритмически простую процедуру анализа структурной чувствительности efTS-модели. Она заключается в проверке степени активаций нечетких правил, входящих в БЗ efTS-модели, до и после текущего момента времени  $t$ . Если хотя бы для одного из правил  $\alpha_i$  степень его активации  $\alpha_i(t)$  в момент  $t$  меняется с меньшего значения  $\alpha_i(t-1)$  на большее  $\alpha_i(t)$ , то фиксируется смена состояний ТП в момент времени  $t$ .

#### 4. Организация механизма извлечения знаний из потоковых данных

Новые знания в системе ИМ генерируются в моменты перехода ТП из одних состояний в другие. Для этих целей предлагается энтропийный подход и критерий выявления соответствующих паттернов в потоке входных данных, сопровождающих течение ТП.

При нахождении ТП в момент времени  $t$  в одном определенном состоянии активации  $\alpha_i$  нечетких правил, характеризующие данное состояние, принимают либо близкие к единице, либо близкие к нулю значения, уменьшая тем самым энтропию их распределения. В процессе смены или в преддверии новых состояний, происходит уменьшение значений активаций от  $\alpha_i(t-1)$  до  $\alpha_i(t)$  для одной группы нечетких правил  $\alpha_i$  и одновременно увеличение от  $\alpha_i(t-1)$  до  $\alpha_i(t)$  для другой группы правил  $\alpha_j$ , описывающих соответственно исчезающее и вновь появляющееся состояние ТП. В результате в переходный момент происходит выравнивание значений активаций нечетких правил в обеих группах. Это приводит к резкому повышению энтропии распределения значений системных переменных, которую можно выразить в виде критерия:

(4.1)

где  $q$  – число нечетких правил в текущей БЗ efTS-модели.

Полученное выражение выступает в качестве критерия смены состояний и в потоке мониторинговых данных. Пороговое значение для статистики определяется на основе обучения с использованием массива данных, описывающих сценарий нахождения ТП в стабильных состояниях.

Как упоминалось, нечеткие правила эволюционирующей efTS-модели выступают в качестве элементарных единиц знаний о связи параметров ТП с классами состояний. Поэтому стратегия извлечения знаний, реализуемая в системе ИМ, сводится к выявлению фактов смены со-



стояний на основе критерия (3.1) и интерпретации antecedентов нечетких правил, активации которых претерпевают изменения в переходный моменты времени. Измененные antecedенты нечетких правил образуют новые единицы элементарных знаний, заносимые в БЗ eFTS-модели.

Следует отметить, что изначально БЗ eFTS-модели формируется экспертами и в последствии по мере поступления новых данных эволюционирует под управлением инкрементного механизма online-обучения путем включения/исключения из нее нечетких правил и/или изменения их параметров.

Благодаря интерпретируемости eFTS-модели и ее адаптационным свойствам, а также способности eFTS извлекать знания из потока данных в online режиме данная модель выбрана в качестве базовой модели для системы ИМ.

## Заключение

В статье рассмотрены некоторые важные аспекты организации интеллектуального мониторинга ТП на основе использования нового класса нечетких эволюционирующих моделей, eFTS. Отличительными особенностями eFTS-модели по отношению к традиционным нечетким моделям являются возможность online обработки потоковых данных на основе заложенного в модель механизма инкрементного обучения, способность извлекать “на лету” из потоковых данных знания в виде нечетких “IF-THEN”-правил, а также возможность интерпретировать состояния ТП путем сопоставления текущих параметров ТП с лингвистическими описаниями состояний ТП, указанными в предусловиях нечетких правил.

В статье также предложен новый принцип организации структурно-чувствительного механизма обучения eFTS-модели, обеспечивающего возможность системной модели синхронизировать свое поведение с ходом ТП и обнаруживать на основе анализа происходящих в модели структурных изменений характерные особенности в поведении ТП. Достоинством “структурно-чувствительного” подхода к анализу информации является то, что структурные изменения, происходящие в eFTS-модели под воздействием внешних изменений во входных данных, являются более выраженными и более четко проявляются в потоке данных, нежели плавные параметрические регуляции, что упрощает обнаружение соответствующих событий в данных мониторинга. Для практического использования структурно-чувствительного подхода в алгоритмах мониторинга предложен формальный критерий структурной чувствительности eFTS-модели. На основе приведенного критерия возможна разработка алгоритмически простой процедуры анализа структурной чувствительности системной модели для ее использования в алгоритмах аналитики данных и машинного обучения.

## Список литературы

- [Zhao et al., 2020] Zhao Yang, et al. A review of data mining technologies in building energy systems: Load prediction, pattern identification, fault detection and diagnosis // *Energy and Built Environment*. – 2020. – 1.2. – P. 149-164.
- [Takagi et al., 1985] Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. – 1985. – 15(1). – P. 116-132.
- [Kovalev et al., 2020] Kovalev S., Kolodenkova A., Sukhanov A. Incremental Structure-Evolving Intelligent Systems with Advanced Interpretational Properties / In: Kuznetsov S.O., Panov A.I., Yakovlev K.S. (eds) // *Artificial Intelligence. RCAI 2020. Lecture Notes in Computer Science*. – Vol. 12412. – Springer, Cham, 2020.
- [Chiu et al., 1994] Chiu S. Fuzzy Model Identification Based on Cluster Estimation // *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. – 1994. – Vol. 2(3). – P. 267-278.
- [Abraham et al., 2005] Abraham W.C., Robins A. Memory retention – the synaptic stability versus plasticity dilemma // *Trends in Neurosciences*. – 2005. – 28(2). – P. 73-78.
- [Долгий и др., 2018] Долгий А.И., Ковалев С.М. Диагностирование устройств железнодорожной автоматики и подвижного состава на основе иммунного подхода // *Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям "IS&IT'18"*. – 2018. – С. 18-26.
- [Dolgiy et al., 2022] Dolgiy A., Khramtsov A., Kovalev S. Intelligent Models for State Assessment and Behavior Prediction in Railway Processes Based on Descriptive Analytics and Soft Computing // *Proceedings of the Sixth International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'22), Istanbul, 2022*. – Vol. 566. – P. 358-368.
- [Мелихов и др., 1981] Мелихов А.Н., Берштейн Л.С. Конечные четкие и расплывчатые множества: Ч. 11. Расплывчатые множества. – Таганрог: ТРТИ, 1981.
- [Lu et al., 2018] Lu J., Liu A., Dong F., Gu F., Gama J., and Zhang G. Learning under concept drift: A review // *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, – 2018. – 31(12). – P. 2346-2363.