

# НЕЧЕТКИЙ КОГНИТИВНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

**В.В. Борисов**

*e-mail: vbor67@mail.ru*

# Проблемы исследования сложных систем и процессов

- разнородность объектов и компонентов, многообразие и разнотипность связей и взаимозависимостей между ними, которые не поддаются точному и детализированному описанию; невозможность формализованного представления и анализа системы/процессов в рамках единой модели;
- неясность выделения «границ» системы, ее состояний, проблемных ситуаций;
- получение приемлемой информации для построения «точных» моделей – трудоемкая, дорогостоящая или нерешаемая задача;
- информации доступна либо в виде экспертных данных, либо в эвристическом виде, и ее недостаточно для задания аналитических зависимостей;
- оценка системных параметров выполняется с использованием различных измерительных и оценочных шкал;
- традиционные модели не позволяют учесть все типы неопределенности.

# Типовые задачи для нечетких когнитивных моделей

- анализ устойчивости системы, проблемных ситуаций;
- анализ непосредственного, агрегированного и опосредованного влияния системных факторов друг на друга;
- оценка системных показателей;
- анализ достижимости целевых ситуаций;
- сценарный анализ при различных воздействиях;
- прогноз изменения состояния системных факторов;
- моделирование динамики изменения состояния системных факторов.

## Типы нечетких когнитивных моделей

- нечеткие когнитивные карты Б. Коско и их разновидности;
- нечеткие когнитивные карты В. Силова;
- нечеткие продукционные когнитивные карты;
- *обобщенные продукционные нечеткие когнитивные модели;*
- *нечеткие реляционные когнитивные модели;*
- *«совместимые» нечеткие когнитивные модели;*
- *нечеткие когнитивно-игровые модели;*
- *нечеткие коалиционные когнитивные модели;*
- *нечетко-нейросетевые когнитивные темпоральные модели.*

# Особенности нечетких когнитивных моделей и методов

- формализация и анализ не только системы, но и «локализация» отдельных проблемных ситуаций с обеспечением требуемого уровня достоверности анализа моделирования;
- совместное использование разнородной информации, измеряемой и оцениваемой с использованием различных шкал;
- учет непосредственного, опосредованного и агрегированного взаимовлияния системных и внешних факторов; обеспечение эмерджентности моделируемой системы/процесса/проблемной ситуации;
- единство представления и анализа значений системных параметров, внешних факторов, целевых функций и ограничений за счет их нечеткой грануляции;
- представление взаимозависимостей между объектами и компонентами в виде нечетких отношений взаимовлияния обеспечивает единый подход к анализу системы с использованием методов *нечеткой каузальной алгебры*;
- наглядность и хорошие интерпретационные свойства процесса и промежуточных/итоговых результатов нечеткого когнитивного моделирования;
- адекватный учет различных типов неопределенности (стохастической, статистической, нестохастической) в рамках единой модели;
- используются, в основном, для предварительного анализа сложных систем и процессов (для формализации проблемных ситуаций, анализа взаимовлияния факторов, анализа устойчивости, прогнозной оценки состояния, моделирования системной динамики).

## Подходы к использованию нечетких когнитивных моделей и методов для анализа сложных систем и процессов

- I. Предварительный анализ сложных систем и проблемных ситуаций, результаты которого относительно независимо используются для их последующего, более углубленного исследования.
- II. Гибридизация нечетких когнитивных моделей на основе *принципа «функционального замещения»*, состоящего в замене или усовершенствовании отдельных компонентов нечетких когнитивных моделей компонентами других моделей, позволяющих, таким образом, расширить возможности и улучшить свойства «базовых» моделей.
- III. Построение композиционных гибридных нечетких моделей на основе *принципа гибридизации «с взаимодействием»*, когда разные нечеткие модели используются относительно независимо и выполняют различные задачи по достижению общей цели.

# Нечеткие когнитивные модели для предварительного анализа сложных систем с использованием результатов для последующего их исследования (примеры)

## Пример 1. Оценка состояния городской энергосистемы

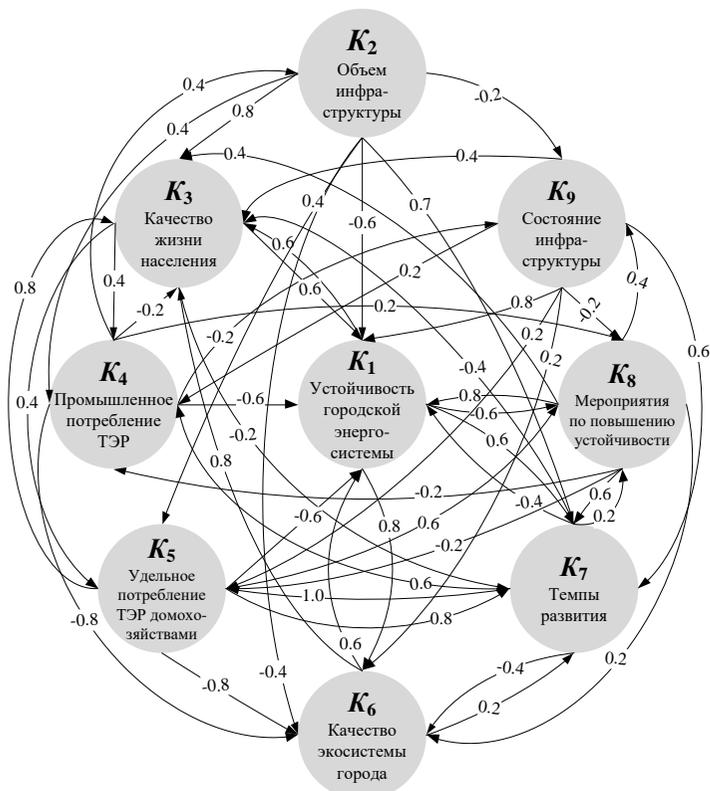


Рис. 1. Структура нечеткой когнитивной модели (НКМ) оценки состояния городской энергосистемы

Матрица взаимовлияний НКМ:  $\mathbf{W} = \begin{pmatrix} w_{11} & \dots & w_{1N} \\ \dots & \dots & \dots \\ w_{N1} & \dots & w_{NN} \end{pmatrix}$ ,

Влияние на концепт  $K_j$  смежных концептов:  $K_j = \mathbf{S}_{i=1}^n (K_i \mathbf{T} w_{ij})$ ,

$l$ -й путь между  $K_i$  и  $K_j$ :

$$K_i \xrightarrow{l} K_j : d_l = (K_i, K_{z_1}, \dots, K_j), l = 1, \dots, L, \quad w_{ij} = \mathbf{S}_{l=1}^L \left( \mathbf{T} w_{k,k+1} \right)_{k \in d_l}$$

1) Преобразование матрицы  $\mathbf{W}$  в матрицу  $\mathbf{V} = \|\|v_{ij}\|\|_{2N \times 2N}$ :

$$v_{2i-1, 2j-1} = w_{ij} \text{ and } v_{2i, 2j} = w_{ij}, \text{ if } w_{ij} > 0;$$

$$v_{2i-1, 2j-1} = -w_{ij} \text{ and } v_{2i, 2j} = -w_{ij}, \text{ if } w_{ij} < 0.$$

2) Транзитивное замыкание матрицы  $\mathbf{V}$ :

$$\widehat{\mathbf{V}} = \mathbf{V} \vee \mathbf{V}^2 \vee \dots; \quad \mathbf{V}^m = \mathbf{V}^{m-1} \circ \mathbf{V}, \quad v_{ik}^m = \max_j (v_{ik}^{m-1} \cdot v_{jk}).$$

3) Преобразование матрицы  $\widehat{\mathbf{V}}$  в матрицу  $\widehat{\mathbf{W}} = \|\|(w_{ij}, \bar{w}_{ij})\|\|_{N \times N}$ :

$$w_{ij} = \max(v_{2i-1, 2j-1}, v_{2i, 2j}), \quad \bar{w}_{ij} = \max(v_{2i-1, 2j}, v_{2i, 2j-1}).$$

# Нечеткие когнитивные модели для предварительного анализа сложных систем с использованием результатов для последующего их исследования (примеры)

## Пример 1. Оценка состояния городской энергосистемы (продолжение)

**Табл. 1. Основные системные показатели НКМ**

Транзитивно замкнутая матрица  $\widehat{W}$  взаимовлияний 1) Влияние концепта  $K_i$  на концепт  $K_j$ :  $p_{ij} = \text{sign}(w_{ij} + \bar{w}_{ij}) \max(|w_{ij}|, |\bar{w}_{ij}|)$ .

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$	$K_9$
$K_1$	0.48; -0.48	0.102; -0.096	0.64; -0.307	0.256; -0.24	0.256; -0.123	0.8; -0.384	0.205; -0.4	0.288; -0.6	0.115; -0.24
$K_2$	0.48; -0.6	0.168; -0.061	0.8; -0.384	0.42; -0.154	0.4; -0.154	0.384; -0.48	0.7; -0.192	0.36; -0.288	0.144; -0.2
$K_3$	0.6; -0.288	0.16; -0.058	0.384; -0.256	0.4; -0.144	0.4; -0.102	0.48; -0.32	0.32; -0.24	0.24; -0.36	0.096; -0.144
$K_4$	0.288; -0.6	0.4; -0.102	0.32; -0.64	0.168; -0.256	0.16; -0.256	0.23; -0.8	0.28; -0.205	0.36; -0.173	0.144; -0.2
$K_5$	0.48; -0.6	0.192; -0.102	0.8; -0.64	0.48; -0.256	0.32; -0.256	0.384; -0.8	0.8; -0.205	0.6; -0.288	0.24; -0.115
$K_6$	0.6; -0.288	0.128; -0.058	0.8; -0.205	0.32; -0.144	0.32; -0.082	0.48; -0.256	0.256; -0.24	0.192; -0.36	0.077; -0.144
$K_7$	0.192; -0.4	0.24; -0.064	0.192; -0.4	0.6; -0.16	0.096; -0.16	0.154; -0.48	0.168; -0.128	0.24; -0.115	0.096; -0.12
$K_8$	0.8; -0.384	0.144; -0.08	0.512; -0.246	0.36; -0.2	0.205; -0.2	0.64; -0.307	0.6; -0.32	0.23; -0.48	0.4; -0.192
$K_9$	0.8; -0.384	0.144; -0.077	0.512; -0.246	0.36; -0.192	0.205; -0.098	0.64; -0.307	0.6; -0.32	0.23; -0.48	0.4; -0.192

2) Консонанс влияния концепта  $K_i$  на концепт  $K_j$ :  $c_{ij} = \frac{|w_{ij} + \bar{w}_{ij}|}{|w_{ij}| + |\bar{w}_{ij}|}$ .

3) Взаимный консонанс влияния концептов  $K_i$  и  $K_j$ :  $\tilde{c}_{ij} = \frac{|(w_{ij} + w_{ji}) + (\bar{w}_{ij} + \bar{w}_{ji})|}{|w_{ij} + w_{ji}| + |\bar{w}_{ij} + \bar{w}_{ji}|}$ .

4) Влияние  $i$ -го концепта на систему:  $\vec{P}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_{ij}$ .

5) Воздействие (влияние) системы на  $j$ -й концепт:  $\vec{P}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{ij}$ .

6) Консонанс влияния  $i$ -го концепта на систему:  $\vec{C}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{ij}$ .

7) Консонанс влияния системы на  $j$ -й концепт:  $\vec{C}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_{ij}$ .

### Некоторые выводы:

- на состояние энергосистемы города наибольшее положительное влияние оказывают (по степени этого влияния): мероприятия по повышению устойчивости городской энергосистемы ( $K_8$ ); состояние инфраструктуры городской энергосистемы ( $K_9$ ); качество экосистемы города ( $K_6$ ); качество жизни населения ( $K_3$ ). Наибольшее отрицательное влияние на энергосистему города оказывает промышленное потребление топливно-энергетических ресурсов ( $K_4$ );
- состояние энергосистемы города наибольшее положительное влияние оказывает на (по степени влияния): качество жизни населения ( $K_3$ ); темпы развития города ( $K_7$ ); промышленное потребление ТЭР ( $K_4$ ). В свою очередь, отрицательное влияние состояние энергосистемы города оказывает на состояние инфраструктуры городской энергосистемы ( $K_9$ ).

# Нечеткие когнитивные модели для предварительного анализа сложных систем с использованием результатов для последующего их исследования (примеры)

## Пример 1. Моделирование динамики изменения состояния городской энергосистемы (продолжение)

$$K_j(t+1) = \sum_{i=1}^n w_{ij} K_i(t), \quad \text{для НКК В. Силова: } K_j(t+1) = \mathbf{S} \left( K_i(t) \mathbf{T} w_{ij} \right),$$

$$\Delta K_j(t+1) = \sum_{i=1}^n w_{ij} \Delta K_i(t),$$

$$\Delta K_j(t+1) = \sum_{i=1}^n w_{ij} K_i(t),$$

где  $n$  – число концептов, непосредственно влияющих на концепт  $j$ -й концепт;  $K_i(t)$  и  $\Delta K_i(t)$  – значение и приращение значения  $i$ -го концепта в момент времени  $t$ ;  $K_j(t+1)$  и  $\Delta K_j(t+1)$  – значение и приращение значения  $j$ -го концепта в момент времени  $(t+1)$ .

Для недопущения выхода значений концептов за границы заданного диапазона можно использовать нелинейную функцию  $f$ , ограничивающую значение концепта-приемника в  $[0, 1]$  или  $[-1, 1]$ :

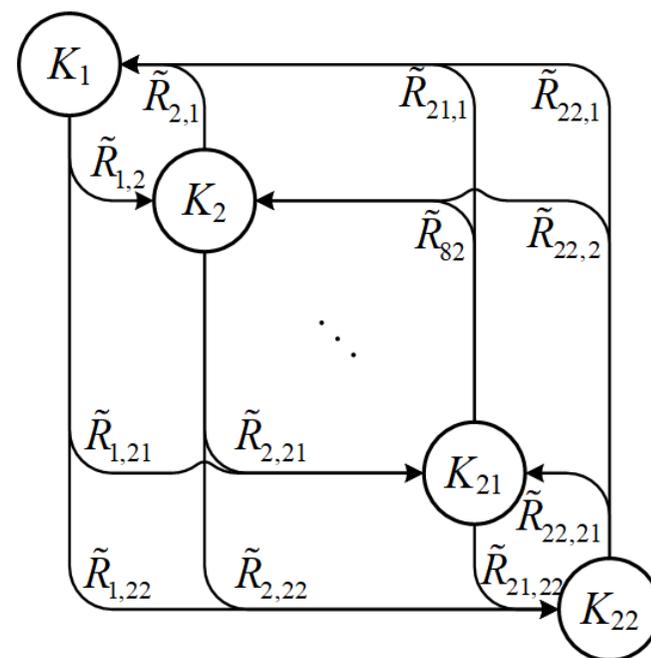
$$K_j(t+1) = f \left( \sum_{i=1}^n w_{ij} K_i(t) \right),$$

где в качестве функции  $f$  может использоваться, например, сигмоидальная функция.

# Нечеткие когнитивные модели для предварительного анализа сложных систем с использованием результатов для последующего их исследования (примеры)

## Пример 2. Мониторинг динамики изменения кластеров социотехнических систем (СТС)

Объекты																						
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$	$a_{16}$	$a_{17}$	$a_{18}$	$a_{19}$	$a_{20}$	$a_{21}$	$a_{22}$
$p_1(a_i)$	0.329	0.448	0.505	0.218	0.209	0.215	0.230	0.145	0.123	0.137	0.143	0.142	0.334	0.145	0.122	0.023	0.162	0.162	0.351	0.284	0.202	0.172
$p_2(a_i)$	0.309	0.330	0.307	0.237	0.272	0.223	0.263	0.183	0.114	0.204	0.199	0.175	0.237	0.153	0.096	0.106	0.165	0.099	0.309	0.330	0.271	0.223
$p_3(a_i)$	0.678	0.692	0.659	0.512	0.491	0.480	0.675	0.612	0.348	0.474	0.649	0.420	0.645	0.667	0.623	0.376	0.422	0.643	0.649	0.552	0.715	0.610



**Рис. 1.** Нечеткая когнитивная модель для оценки взаимовлияния между объектами СТС

# Нечеткие когнитивные модели для предварительного анализа сложных систем с использованием результатов для последующего их исследования (примеры)

## Пример 2. Мониторинг динамики изменения кластеров СТС (метод)

**Этап 1.** Расчет системных характеристик, основанных на согласованных нечетких отношениях взаимовлияния нечеткой когнитивной модели с целью выбора показателей для идентификации кластеров социотехнической системы (СТС).

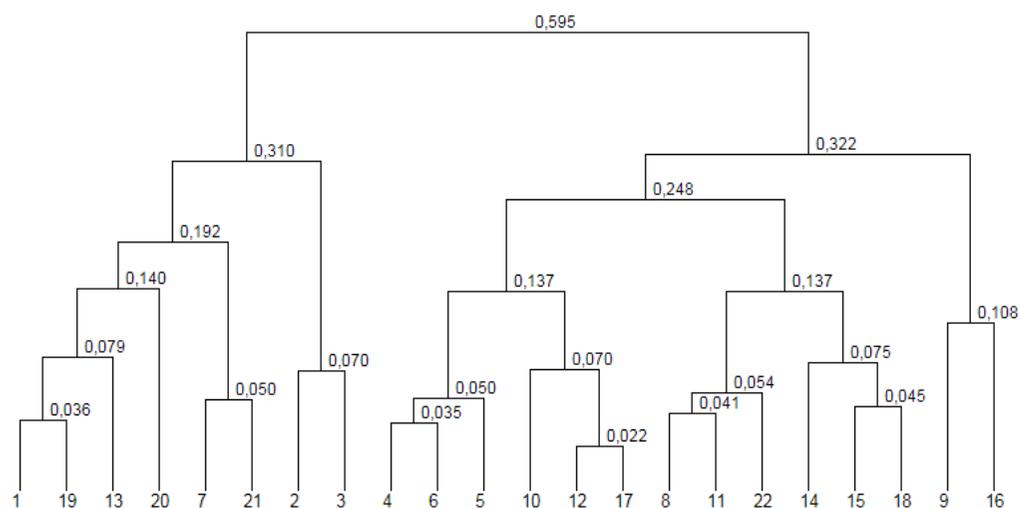
Показатели для идентификации кластеров СТС, основанные на согласованных нечетких отношениях взаимовлияния между объектами СТС:

- влияние объекта (концепта) на СТС: 
$$p_1(a_i) = \frac{1}{I} \sum_{j=1}^I \left( \text{sign}(r'_{ij} + \bar{r}'_{ij}) \max(|r'_{ij}|, |\bar{r}'_{ij}|) \right), \quad i = 1..I;$$
- влияние СТС на объект: 
$$p_2(a_i) = \frac{1}{I} \sum_{j=1}^I \left( \text{sign}(r'_{ji} + \bar{r}'_{ji}) \max(|r'_{ji}|, |\bar{r}'_{ji}|) \right), \quad i = 1..I;$$
- согласованное влияние объекта на СТС: 
$$p_3(a_i) = \frac{1}{I} \sum_{j=1}^I \frac{|r'_{ij} + \bar{r}'_{ij}|}{|r'_{ij}| + |\bar{r}'_{ij}|}, \quad i = 1..I.$$

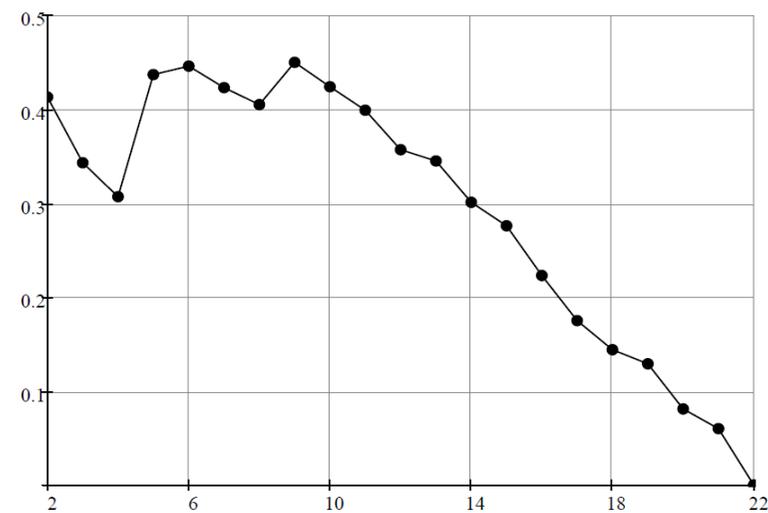
# Нечеткие когнитивные модели для предварительного анализа сложных систем с использованием результатов для последующего их исследования (примеры)

## Пример 2. Мониторинг динамики изменения кластеров СТС (метод, продолжение)

**Этап 2.** Первоначальная идентификация кластеров СТС и предварительный анализ устойчивости СТС.



**Рис. 1.** Дендрограмма первоначального разделения объектов энергетической системы Смоленского региона



**Рис. 2.** Зависимость качества кластеризации от числа кластеров

# Нечеткие когнитивные модели для предварительного анализа сложных систем с использованием результатов для последующего их исследования (примеры)

## Пример 2. Мониторинг динамики изменения кластеров СТС (метод, продолжение)

**Этап 3.** Мониторинг динамики изменения кластеров СТС, заключающийся в анализе в каждый момент модельного времени:

- во-первых, изменения кластерной структуры системы (дрейф центров кластеров, исчезновение и появление новых кластеров, их объединение и разделение);
- во-вторых, устойчивости кластеров СТС на основе оценки результатов транзитивного замыкания нечетких отношений взаимовлияния между их объектами.

*Матрица степеней принадлежности объектов к идентифицированным кластерам энергетической системы Смоленского региона*

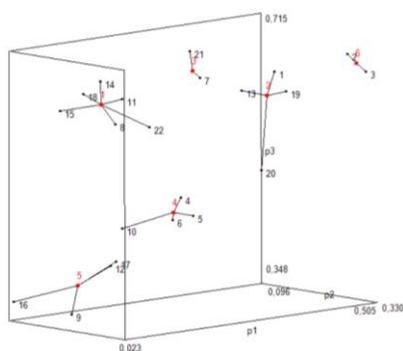
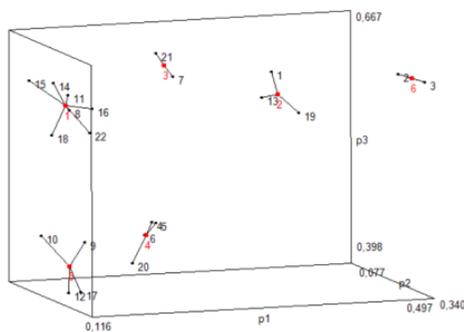


Рис. 1. Первоначальная кластеризация

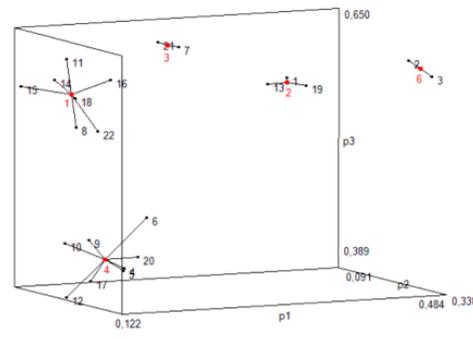
Кластеры	Объекты																					
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$	$a_{16}$	$a_{17}$	$a_{18}$	$a_{19}$	$a_{20}$	$a_{21}$	$a_{22}$
1	.005	.004	.005	.011	.024	.022	.031	.022	<b>.875</b>	.277	.010	<b>.752</b>	.019	.019	.016	<b>.680</b>	<b>.681</b>	.007	.005	.055	.038	.011
2	.035	<b>.908</b>	<b>.930</b>	.004	.008	.005	.055	.009	.008	.019	.005	.010	.084	.011	.005	.021	.013	.003	.050	.097	.063	.006
3	<b>.917</b>	.060	.038	.010	.020	.011	.317	.024	.014	.041	.016	.019	<b>.721</b>	.028	.011	.035	.025	.008	<b>.902</b>	<b>.348</b>	.248	.021
4	.014	.010	.010	<b>.947</b>	<b>.899</b>	<b>.928</b>	.102	.052	.051	<b>.452</b>	.023	.138	.059	.035	.020	.106	.181	.011	.016	.294	.098	.043
5	.010	.007	.007	.010	.017	.013	.110	.202	.027	.090	.091	.039	.044	<b>.604</b>	<b>.888</b>	.085	.049	<b>.932</b>	.010	.067	.142	.048
6	.019	.010	.010	.019	.032	.021	<b>.386</b>	<b>.692</b>	.025	.121	<b>.855</b>	.042	.075	.303	.060	.073	.051	.039	.017	.139	<b>.412</b>	<b>.870</b>

# Нечеткие когнитивные модели для предварительного анализа сложных систем с использованием результатов для последующего их исследования (примеры)

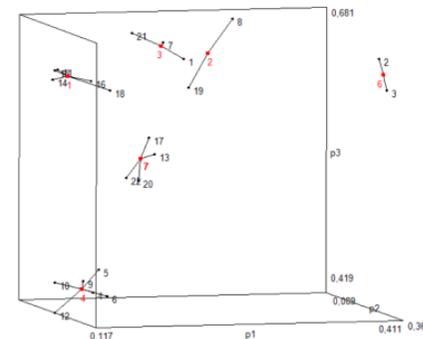
## Пример 2. Мониторинг динамики изменения кластеров СТС (метод, продолжение)



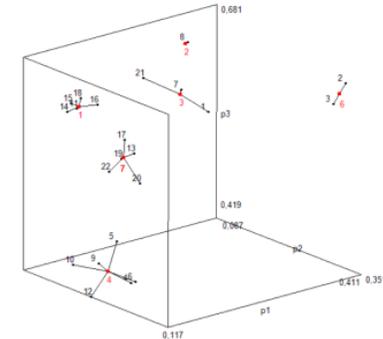
**Рис. 1.** Результаты кластеризации для  $t = 1$



**Рис. 2.** Результаты кластеризации для  $t = 2$



**Рис. 3.** Результаты кластеризации для  $t = 3$



**Рис. 4.** Результаты кластеризации для  $t = 4$

### *Некоторые выводы:*

- к моменту времени  $t = 1$  объект  $a_{10}$  переходит из кластера  $c_4$  в кластер  $c_5$ , объект  $a_{16}$  – из кластера  $c_5$  в кластер  $c_1$ , объект  $a_{20}$  – из кластера  $c_2$  в кластер  $c_4$ ; заметен дрейф центров всех кластеров, при этом в наибольшей степени дрейфует центр кластера  $c_5$ ;
- к моменту  $t = 2$  кластер  $c_4$  и кластер  $c_5$  объединяются;
- к моменту  $t = 3$  объект  $a_1$  переходит в кластер  $c_3$ , объект  $a_8$  – в кластер  $c_2$ ; появляется новый кластер  $c_7$ , состоящий из объектов  $\{a_{13}, a_{17}, a_{20}, a_{22}\}$ ;
- в момент  $t = 4$  в кластер  $c_7$  также переходит объект  $a_{19}$ .

# Нечеткие когнитивные модели для предварительного анализа сложных систем с использованием результатов для последующего их исследования (примеры)

## Пример 3. Анализ динамики стилей в стихотворных текстах (постановка задачи)

### Постановка задачи

Разделим множество признаков стихотворных текстов на подмножества:

$P = \{P_j\}$ ,  $P_j = \{p_{m_j}\}$  –  $j$ -е подмножество признаков,  $m_j = 1, \dots, M_j$ ,  $j = 1, \dots, J$ .

**Морфологические признаки:**  $P_1 = \{p_{m_1}\}$ ,  $m_1 = 1, \dots, M_1$ ,  $M_1 = 18$ .

**Синтаксические признаки** –  $P_2 = \{p_{m_2}\}$ ,  $m_2 = 1, \dots, M_2$ ,  $M_2 = 8$ .

**Ритмические признаки:**  $P_3 = \{p_{m_3}\}$ ,  $m_3 = 1, \dots, M_3$ ,  $M_3 = 5$ .

К анализу привлечено 80 лирических стихотворений М.Ю. Лермонтова, написанных четырехстопном ямбом и относящихся к различным периодам его творчества:

- 1-й период (1828-1831 гг.):  $A_1 = \{a_{n_1}\}$ ,  $n_1 = 1, \dots, N_1$ ,  $N_1 = 48$ ;
- 2-й период (1832-1936 гг.):  $A_2 = \{a_{n_2}\}$ ,  $n_2 = 1, \dots, N_2$ ,  $N_2 = 16$ ;
- 3-й период (1837-1841 гг.):  $A_3 = \{a_{n_3}\}$ ,  $n_3 = 1, \dots, N_3$ ,  $N_3 = 16$ .

Табл. 1. Анализируемые произведения М.Ю. Лермонтова

Обозначение и название произведения	Обозначение и название произведения	Обозначение и название произведения
$a_1$ Поэт	$a_{28}$ Посвящение	$a_3$ Посвящение («Прими, прими мой грустный труд...»)
$a_2$ К Д...ву	$a_{29}$ «Вблизи тебя до этих пор...»	$a_6$ Парус
$a_3$ Пир	$a_{30}$ Нищий	$a_9$ «Слова разлуки повторяя...»
$a_4$ К... («Не привлекай меня красой!..»)	$a_{31}$ Опасение	$a_{10}$ Солнце
$a_5$ Мой демон	$a_{32}$ «Ты помнишь ли, как мы с тобою...»	$a_{11}$ «Ты молод. Цвет твоих кудрей...»
$a_6$ К*** («Глядися чаще в зеркала...»)	$a_{33}$ 1831-го января	$a_{12}$ «В альбом Н.Ф. Ивановой»
$a_7$ Молитва («Не обвиняй меня, всесильный...»)	$a_{34}$ Звуки и взор	$a_{13}$ «Когда последнее мгновение...»
$a_8$ Черкешенка	$a_{35}$ Романс к Д... («Когда я унесу в чужбину...»)	$a_{14}$ «Я жить хочу! хочу печали...»
$a_9$ Война	$a_{36}$ «Когда б в покорности незнания...»	$a_{15}$ «Как луч зары, как розы Лея...»
$a_{10}$ К*** («Мы снова встретились с тобой»)	$a_{37}$ К кн. Л. Г-ой	$a_{16}$ «По произволу дивной власти»
$a_{11}$ Романс («Коварной жизнью недовольный...»)	$a_{38}$ «Пусть я кого-нибудь люблю...»	$a_{17}$ Ветка Палестины
$a_{12}$ Ответ	$a_{39}$ «Пора уснуть последним сном...»	$a_{18}$ «Расстались мы, но твой портрет...»
$a_{13}$ Баллада	$a_{40}$ К другу В. Ш... («...»)	$a_{19}$ «Я не хочу, чтоб свет узнал...»
$a_{14}$ К* (Из Шиллера)	$a_{41}$ «Как дух отчаянья и зла...»	$a_{20}$ «Спеша на север из далека...»
$a_{15}$ К Грузинову	$a_{42}$ «Я не для ангелов и рай...»	$a_{21}$ Она поет
$a_{16}$ Жена севера	$a_{43}$ «Метель шумит и снег валит...»	$a_{22}$ «Гляжу на будущность с боязнью...»
$a_{17}$ Раскаянье	$a_{44}$ Силуэт	$a_{23}$ А.Г. Хомутовой
$a_{18}$ К*** («Не говори: одним высоким...»)	$a_{45}$ 23-го марта 1831 г.	$a_{24}$ Вид гор из степей Козлова
$a_{19}$ В альбом («Нет! — я не требую вниманья...»)	$a_{46}$ «Я не люблю тебя, страстей...»	$a_{25}$ А.О. Смирновой
$a_{20}$ Кавказу	$a_{47}$ «Зови надежду - свиденьем...»	$a_{26}$ М. П. Соломирской
$a_{21}$ 11 июля	$a_{48}$ Трубечкому (Новогодние эпиграммы)	$a_{27}$ Из альбома С.Н. Карамзиной
$a_{22}$ Чума в Саратове («Чума явилась в наш предел...»)	$a_{49}$ «Люблю я цепи синих гор...»	$a_{28}$ Графине Ростопчиной
$a_{23}$ Стансы («Взгляни, как мой спокоен взор...»)	$a_{50}$ Прелестнице	$a_{29}$ Договор
$a_{24}$ К*** («Когда к тебе молвы рассказ...»)	$a_{51}$ «Нет, я не Байрон, я другой...»	$a_{30}$ «Прощай, немая Россия...»
$a_{25}$ «Свершилось! Полно ожидать...»	$a_{52}$ К* («Оставь напрасные заботы...»)	$a_{31}$ Пророк
$a_{26}$ (Глухой красавице)	$a_{53}$ К* («Мой друг, напрасное старанье!..»)	$a_{32}$ Оправдание
$a_{27}$ «Нередко люди и бранили...»	$a_{54}$ «Она не гордой красотою...»	

# Нечеткие когнитивные модели для предварительного анализа сложных систем с использованием результатов для последующего их исследования (примеры)

## Пример 3. Анализ динамики стилей в стихотворных текстах (метод)

**Этап 1.** Определение центров ядер стихотворных произведений (объектов) для подмножеств морфологических, синтаксических и ритмических признаков по всем периодам творчества.

Примечание. Использована предложенная разновидность возможностного алгоритма нечеткой кластеризации (PFCM – *Possibilistic Fuzzy C-Means Algorithm*) для случая единственного кластера.

По результатам этапа определяется совокупность  $C_{A_i, P_j}$  центров ядер  $c_{A_i, P_j}$  подмножеств объектов по всем периодам творчества относительно каждого из морфологических, синтаксических и ритмических признаков:  $C_{A_i, P_j} = \{c_{A_i, P_j}\}$ ,  $i = 1, \dots, I$ ,  $m_j = 1, \dots, M_j$ ,  $j = 1, \dots, J$ , где  $c_{A_i, P_j}$  – центр ядра подмножества объектов  $A_i = \{a_{n_i}\}$  относительно признака  $p_{m_j}$ .

# Нечеткие когнитивные модели для предварительного анализа сложных систем с использованием результатов для последующего их исследования (примеры)

## Пример 3. Анализ динамики стилей в стихотворных текстах (метод, продолжение)

**Этап 2.** Определение степени близости подмножеств объектов для всех периодов творчества к центрам ядер для каждого подмножества признаков.

$$d(C_{A_i, P_j}, P_j(a_{n_i})) = \frac{1}{\sqrt{M_j}} \sqrt{\sum_{m_j=1}^{M_j} (c_{A_i, P_{m_j}} - p_{m_j}(a_{n_i}))^2},$$

$$j = 1, \dots, J, n_i = 1, \dots, N_i, i = 1, \dots, I,$$

где  $P_j(a_{n_i}) = \{p_{m_j}(a_{n_i})\}$  – совокупность значений признаков объекта  $a_{n_i}$ ,  $m_j = 1, \dots, M_j$ .

Табл. 1. Значения показателей близости стихотворных текстов к центрам ядер относительно подмножеств и всего множества признаков по периодам творчества М.Ю. Лермонтова

Периоды творчества	Обозначение произведений	Показатели близости к центрам ядер				Периоды творчества	Обозначение произведений	Показатели близости к центрам ядер				Периоды творчества	Обозначение произведений	Показатели близости к центрам ядер				
		по подмножеству морфологических признаков						по подмножеству синтаксических признаков						по подмножеству ритмических признаков				
		$d(a_i)$	$d(a_i)$	$d(a_i)$	$d(a_i)$			$d(a_i)$	$d(a_i)$	$d(a_i)$	$d(a_i)$			$d(a_i)$	$d(a_i)$	$d(a_i)$	$d(a_i)$	$d(a_i)$
1	$a_1$	0,42	0,85	0,94	0,42	1	$a_{20}$	0,42	0,83	0,81	0,42	2	$a_7$	0,49	0,53	0,79	0,49	
	$a_2$	0,45	0,74	0,95	0,45		$a_{21}$	0,60	0,74	0,37	0,60		$a_8$	0,34	0,34	0,31	0,34	
	$a_3$	0,40	0,61	0,78	0,40		$a_{22}$	0,58	0,77	0,58	0,58		$a_9$	0,59	0,31	0,78	0,31	
	$a_4$	0,63	0,29	0,54	0,29		$a_{23}$	0,79	0,71	0,68	0,71		$a_{10}$	0,30	0,50	0,37	0,30	
	$a_5$	0,66	0,71	0,86	0,66		$a_{24}$	0,49	0,64	0,67	0,49		$a_{11}$	0,71	0,78	0,73	0,71	
	$a_6$	0,67	0,79	0,61	0,67		$a_{25}$	0,72	0,49	0,80	0,49		$a_{12}$	0,40	0,46	0,61	0,40	
	$a_7$	0,85	0,56	0,71	0,56		$a_{26}$	0,63	0,70	0,51	0,63		$a_{13}$	0,42	0,44	0,45	0,42	
	$a_8$	0,51	0,73	0,84	0,51		$a_{27}$	0,56	0,42	0,56	0,42		$a_{14}$	0,40	0,53	0,88	0,40	
	$a_9$	0,42	0,66	0,77	0,42		$a_{28}$	0,73	0,56	0,74	0,56		$a_{15}$	0,33	0,75	0,71	0,33	
	$a_{10}$	0,43	0,47	0,61	0,43		$a_{29}$	0,69	0,70	0,55	0,69		$a_{16}$	0,44	0,65	0,57	0,44	
	$a_{11}$	0,48	0,50	0,79	0,48		$a_{30}$	0,41	0,54	0,55	0,41		3	$a_1$	0,69	0,55	0,75	0,55
	$a_{12}$	0,62	0,58	0,60	0,58		$a_{31}$	0,25	0,43	0,53	0,25			$a_2$	0,45	0,71	0,86	0,45
	$a_{13}$	0,55	0,75	0,33	0,55		$a_{32}$	0,53	0,63	0,85	0,53			$a_3$	0,47	0,38	0,64	0,38
	$a_{14}$	0,26	0,49	0,41	0,26		$a_{33}$	0,28	0,64	0,50	0,28			$a_4$	0,83	0,80	0,86	0,80
	$a_{15}$	0,37	0,31	0,43	0,31		$a_{34}$	0,58	0,83	0,58	0,58			$a_5$	0,43	0,34	0,31	0,34
	$a_{16}$	0,61	0,78	0,69	0,61		$a_{35}$	0,49	0,65	0,83	0,49			$a_6$	0,55	0,53	0,72	0,53
	$a_{17}$	0,84	0,81	0,68	0,81		$a_{36}$	0,31	0,36	0,74	0,31			$a_7$	0,65	0,71	0,64	0,65
$a_{18}$	0,47	0,58	0,47	0,47	$a_{37}$	0,48	0,68	0,66	0,48	$a_8$	0,58	0,63		0,85	0,58			
$a_{19}$	0,52	0,59	0,47	0,52	$a_{38}$	0,42	0,43	0,74	0,42	$a_9$	0,22	0,44		0,66	0,25			
$a_{20}$	0,59	0,48	0,59	0,48	$a_{39}$	0,40	0,36	0,59	0,36	$a_{10}$	0,47	0,60		0,51	0,47			
$a_{21}$	0,73	0,85	0,68	0,73	$a_{40}$	0,37	0,36	0,64	0,36	$a_{11}$	0,42	0,68		0,83	0,42			
2	$a_{22}$	0,63	0,73	0,88	0,63	$a_1$	0,79	0,83	0,57	0,79	$a_{12}$	0,47	0,73	0,91	0,47			
	$a_{23}$	0,46	0,73	0,53	0,46	$a_2$	0,49	0,83	0,67	0,49	$a_{13}$	0,51	0,68	0,94	0,51			
	$a_{24}$	0,41	0,56	0,90	0,41	$a_3$	0,42	0,51	0,51	0,42	$a_4$	0,28	0,43	0,35	0,28			
	$a_{25}$	0,55	0,27	0,71	0,27	$a_4$	0,69	0,60	0,68	0,60	$a_5$	0,44	0,78	0,93	0,44			
	$a_{26}$	0,30	0,77	0,49	0,30	$a_5$	0,61	0,69	0,77	0,61	$a_6$	0,63	0,36	0,67	0,36			
	$a_{27}$	0,38	0,88	0,56	0,38	$a_6$	0,59	0,60	0,54	0,59								

# Нечеткие когнитивные модели для предварительного анализа сложных систем с использованием результатов для последующего их исследования (примеры)

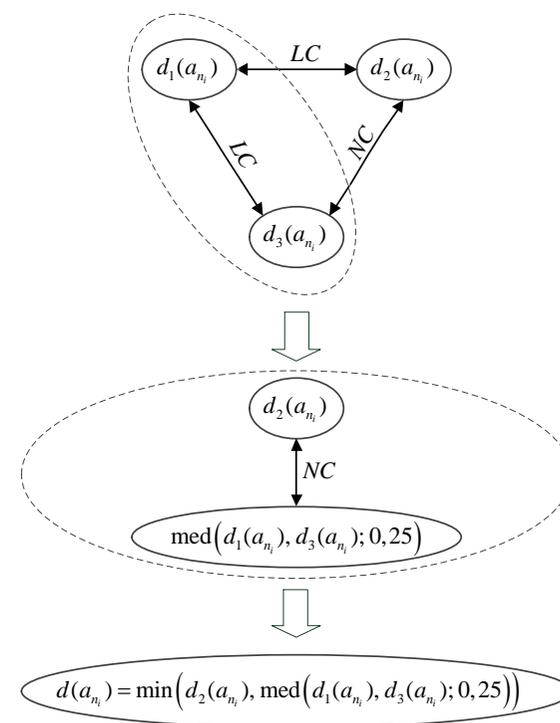
## Пример 3. Анализ динамики стилей в стихотворных текстах (метод, продолжение)

**Этап 3.** Построение нечеткой модели для обобщенной оценки степени близости объектов к центрам ядер по всему множеству признаков с учетом совместимости подмножеств показателей.

**Примечание.** Здесь *NC* и *LC* – «низкий» и «ниже среднего» уровни совместимости между соответствующими подмножествами морфологических, синтаксических и ритмических признаков, которым сопоставляются соответствующие операции свертки показателей:

- для уровня совместимости *NC*:  $\min(d_k(a_{n_i}), d_l(a_{n_i}))$ ,
- для уровня совместимости *LC*:  $\text{med}(d_k(a_{n_i}), d_l(a_{n_i}); 0,25)$ .

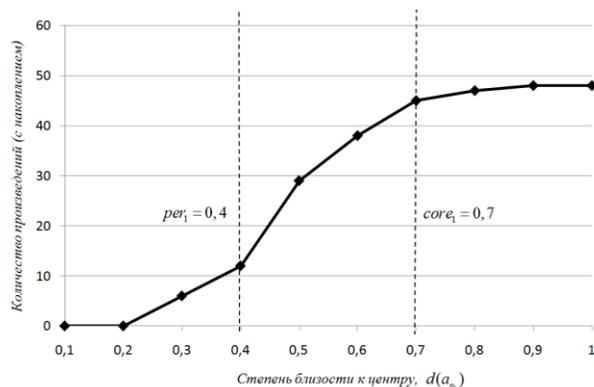
**Рис. 1.** Пример структуры «совместимой» нечеткой когнитивной модели и процедура обобщенной оценки степени близости объектов к центрам ядер относительно всего множества признаков



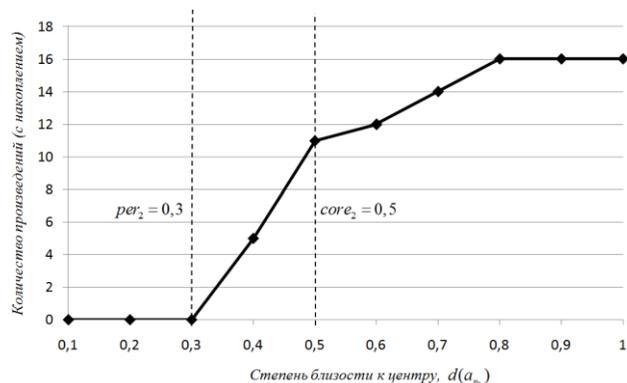
# Нечеткие когнитивные модели для предварительного анализа сложных систем с использованием результатов для последующего их исследования (примеры)

## Пример 3. Анализ динамики стилей в стихотворных текстах (метод, продолжение)

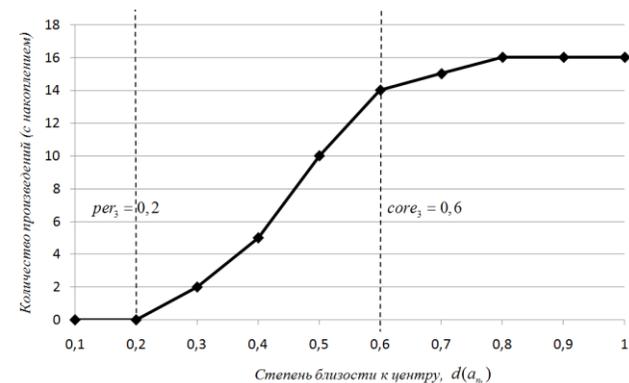
**Этап 4.** Выделение ядер/периферии объектов для различных творческих периодов.



**Рис. 1.** Распределение стихотворных текстов 1-го периода по степени близости к центру ядра ( $core_1 = 0,7$ ,  $per_1 = 0,4$ )



**Рис. 2.** Распределение стихотворных текстов 2-го периода по степени близости к центру ядра ( $core_2 = 0,5$ ,  $per_2 = 0,3$ )



**Рис. 3.** Распределение стихотворных текстов 3-го периода по степени близости к центру ядра ( $core_3 = 0,6$ ,  $per_3 = 0,2$ )

### Примечания.

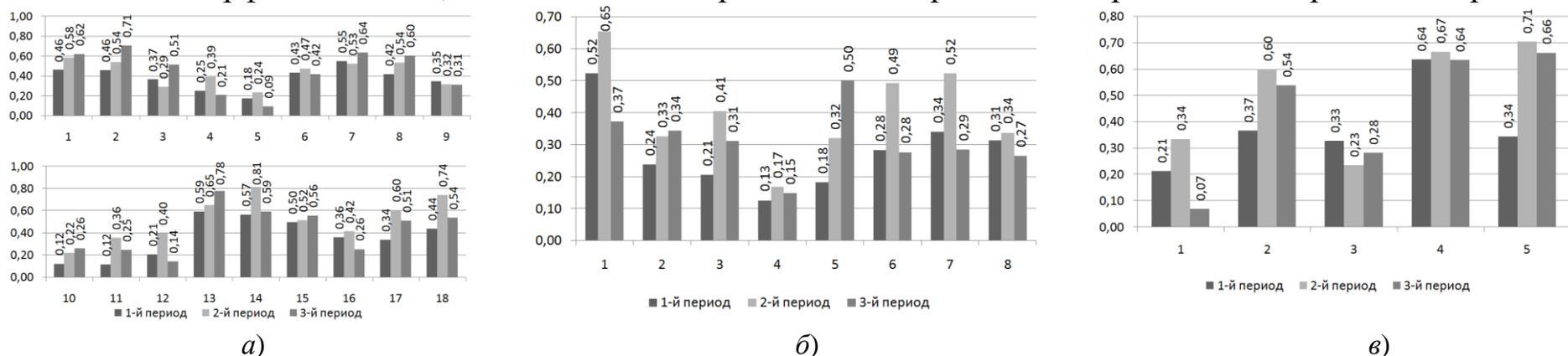
1. Для определения граничных значений ядер и периферии используем результаты анализа построения зависимости количества объектов (с накоплением) от степени близости к центру ядра. При этом для определения этих граничных значений воспользуемся критериями, наподобие критерия «каменистой осыпи».

2. Нахождение ядер/периферии стихотворных произведений может быть выполнено как относительно всего множества признаков, так и относительно подмножеств морфологических, синтаксических и ритмических признаков.

# Нечеткие когнитивные модели для предварительного анализа сложных систем с использованием результатов для последующего их исследования (примеры)

## Пример 3. Анализ динамики стилей в стихотворных текстах (метод, продолжение)

**Этап 5.** Анализ тенденций изменения отдельных показателей близости стихотворных текстов к центрам ядер относительно морфологических, синтаксических и ритмических признаков по различным периодам творчества.



**Рис. 1.** Изменения координат центров ядер относительно морфологических  $p_1 - p_{18}$  (а), синтаксических  $p_1 - p_8$  (б) и ритмических  $p_1 - p_5$  (в) признаков по трем периодам творчества М.Ю. Лермонтова

### **Метод позволяет осуществить**

- определение типичных и отклоняющиеся от канона произведений для различных творческих периодов как относительно отдельных подмножеств признаков, так и всего множества признаков;
- определение степени близости произведений к центру ядра с учетом иерархической структуры оценивания и различного уровня совместимости подмножеств показателей;
- анализ «плотности»/«разреженности» текстов внутри и вокруг ядер относительно отдельных подмножеств и всего множества признаков;
- анализ динамики изменения ядер/периферии стихотворных произведений для различных творческих периодов;
- исследование тенденций изменения отдельных показателей, подмножеств показателей, характеристик ядер и периферии стихотворных произведений по различным периодам творчества.

# Гибридные нечеткие когнитивные модели «с функциональным замещением» для анализа сложных систем и процессов (классификация)

Принцип *гибридизации с «функциональным замещением»* для нечетких когнитивных моделей может быть реализован:

- в рамках одной – нечеткой – технологии,
- на основе сочетания различных интеллектуальных (нечеткой/нейросетевой/эволюционной) технологий.

Гибридизация нечетких когнитивных моделей может быть:

- параметрической,
- структурно-параметрической.

*Эти признаки позволяют предложить и реализовать оригинальный подход к классификации и синтезу гибридных нечетких когнитивных моделей.*

Примечание. В отличие от других гибридных моделей, признак – «нечеткие» – для когнитивных моделей является доминирующим, а признаки – «нейросетевые» и/или «эволюционные» – являются вспомогательными.

# Гибридные нечеткие когнитивные модели «с функциональным замещением» для анализа сложных систем и процессов (классификация)

## Гибридные нечеткие когнитивные модели с параметрической гибридизацией (в рамках одной – нечеткой – технологии)

### 1) Обобщенные продукционные нечеткие когнитивные модели (ОНПКМ)

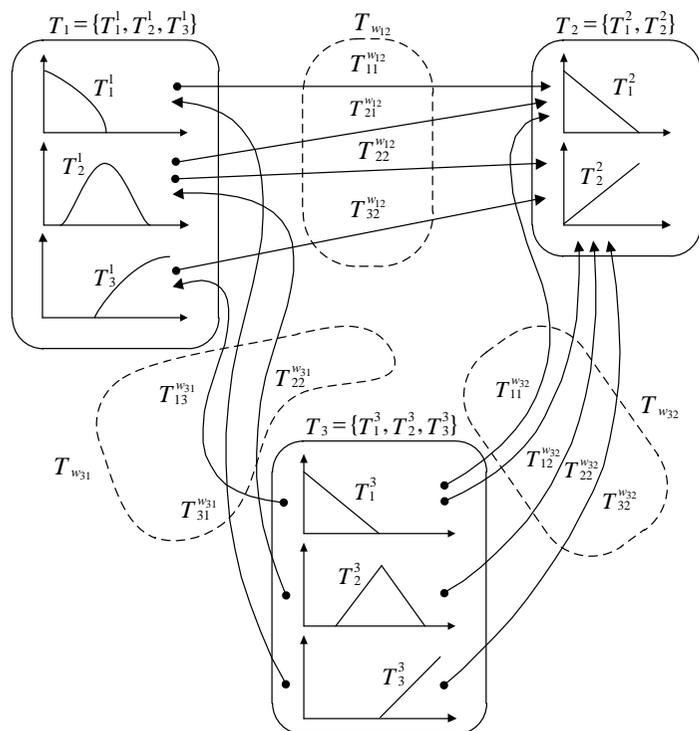


Рис. 1. Структура обобщенной нечеткой продукционной когнитивной модели

$$GRBFCM = (K, W),$$

где  $K = \{K_1, K_2, \dots, K_p\}$  – множество концептов;  $K_i$  описывается лингвистической переменной  $\langle \tilde{K}_i, T_i, D_i \rangle$ , где  $T_i = \{T_1^i, T_2^i, \dots, T_{m_i}^i\}$  – ее термножество;  $m_i$  – число типовых состояний концепта;  $D_i$  – базовое множество  $\tilde{K}_i$ ;  $T_z^i$  описывается нечетким множеством:  $\tilde{C}_z^i = \left\{ \left( \mu_{C_z^i}(d) / d \right) \right\}, d \in D_i$ .

$W = \{w_{ij}\}$  – множество связей между концептами;  $w_{ij}$  ( $i, j \in I = \{1, \dots, p\}$ ) между типовыми состояниями каждой пары концептов задаются одним из значений термножества лингвистической переменной  $\langle \tilde{W}_{ij}, T_{w_{ij}}, D_{w_{ij}} \rangle$ , где  $T_{w_{ij}} = \{T_{11}^{w_{ij}}, \dots, T_{zl}^{w_{ij}}\}$  – ее термножество;  $z \times l$  – число значений  $T_{w_{ij}}$ ;  $D_{w_{ij}}$  – базовое множество  $\tilde{W}_{ij}$ ;  $T_{zl}^{w_{ij}}$  описывается нечетким множеством:  $\tilde{H}_{zl}^{w_{ij}} = \left\{ \left( \mu_{H_{zl}^{w_{ij}}}(d) / d \right) \right\}, d \in D_{w_{ij}}$ .

# Гибридные нечеткие когнитивные модели «с функциональным замещением» для анализа сложных систем и процессов (классификация)

## Гибридные нечеткие когнитивные модели с параметрической гибридизацией (в рамках одной – нечеткой – технологии)

### 1) Обобщенные продукционные нечеткие когнитивные модели (продолжение)

#### Модель динамики ОНПКМ

$$\tilde{K}_j(t+1) = \tilde{K}_j(t) \oplus \left( \bigoplus_{i=1,2,\dots,N} \tilde{f}_{ij} \left( \tilde{K}_i(t), \tilde{K}_j(t), \Delta\tilde{K}_i(t) \right) \right),$$

где  $\tilde{K}_i$ ,  $\Delta\tilde{K}_{ij}$  – нечеткие множества, представляющие значения  $i$ -го концепта и его приращения, смежного с выходным концептом  $j$ ;  $\tilde{K}_j$ ,  $\Delta\tilde{K}_j$  – нечеткие множества, представляющие значения и приращения  $j$ -го концепта;  $\oplus$  – операция нечеткого алгебраического сложения;  $\tilde{f}_{ij}$  – нечеткий оператор, задающий нечеткое отображение типа «много входов – один выход».

#### **Обобщенные нечеткие продукционные когнитивные карты, позволяют обеспечить:**

- полностью нечеткий подход при построении и анализе модели, предполагающий нечеткость концептов, способа передачи влияния, аккумуляирования влияния нескольких концептов на один концепт, обучения, моделирования динамики;
- при нечетком представлении концептов учитывается возможность их количественной интерпретации и сравнения; концепты могут быть представлены в виде нечетких множеств, четких значений, либо синглтонов;
- механизм нечеткого влияния между концептами имеет характер нечеткого отображения. При этом учитывается возможность использования для передачи влияния и четких отображений (функций);
- решена проблема учета отрицательных весов влияния между концептами и аккумуляирования влияний разных знаков. Предложен механизм совместного учета как положительных, так и отрицательных влияний концептов друг на друга не только в виде четких значений или синглтонов, но и в виде функций принадлежности;
- модель динамики учитывает существенную нелинейность поведения моделируемой системы (процессов) за счет совместного учета нечетких состояний и приращений при влиянии входных концептов на выходные;
- процедура аккумуляирования влияний имеет аддитивный, накопительный характер, с возможностью учета вклада самых незначительных по значению влияний вне зависимости от порядка учета отдельных факторов (концептов);
- при аккумуляировании влияний учитывается сдвиг функций принадлежности по координате базового множества.

# Гибридные нечеткие когнитивные модели «с функциональным замещением» для анализа сложных систем и процессов (классификация)

## Гибридные нечеткие когнитивные модели с параметрической гибридизацией (в рамках одной – нечеткой – технологии)

### 2) Нечеткие реляционные когнитивные модели (НРКМ)

В нечеткой реляционной когнитивной модели значения концептов  $K_i, i = \overline{1, N}$  описываются нечеткими множествами  $\tilde{K}_i, i = \overline{1, N}$ , каждое из которых  $\tilde{K}_i = \{(\mu_{K_i}^*(x_i), x_i)\}$  задано на  $X_i$ .

Нечеткие бинарные отношения  $\tilde{R}_{ij}$  между концептами  $K_i$  и  $K_j, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, N}$  задаются в виде матрицы нечетких отношений:

$$\tilde{\mathbf{M}} = \begin{pmatrix} \tilde{R}_{11} & \tilde{R}_{12} & \dots & \tilde{R}_{1N} \\ \tilde{R}_{21} & \tilde{R}_{22} & \dots & \tilde{R}_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{R}_{N1} & \tilde{R}_{N2} & \dots & \tilde{R}_{NN} \end{pmatrix},$$

где  $\tilde{R}_{ij}$  отображение между нечеткими множествами  $\tilde{K}_i$  и  $\tilde{K}_j$ , которое ставит в соответствие  $(x_i, x_j) \in X_i \times X_j$   $\mu_{R_{ij}}(x_i, x_j) \in [0, 1]$ .

#### Модель системной динамики НРКМ

$$\tilde{K}_j(t+1) = \tilde{K}_j(t) \oplus \left( \bigoplus_{i=1}^n ((\tilde{K}_i(t) - \tilde{K}_i(t-1)) \bullet \tilde{R}_{ij}) \right),$$

$\tilde{K}_j(t+1), \tilde{K}_j(t), \tilde{K}_i(t), \tilde{K}_i(t-1)$  – нечеткие значения концептов в соответствующие моменты времени, « $\bullet$ » – нечеткая композиция, « $\bigoplus_{i=1}^n$ » – агрегирование нечетких влияний, « $\rightarrow$ » – приращение нечетких значений концептов, « $\bigoplus$ » – нечеткое агрегирование совокупных влияний и предыдущего значения выходного концепта.

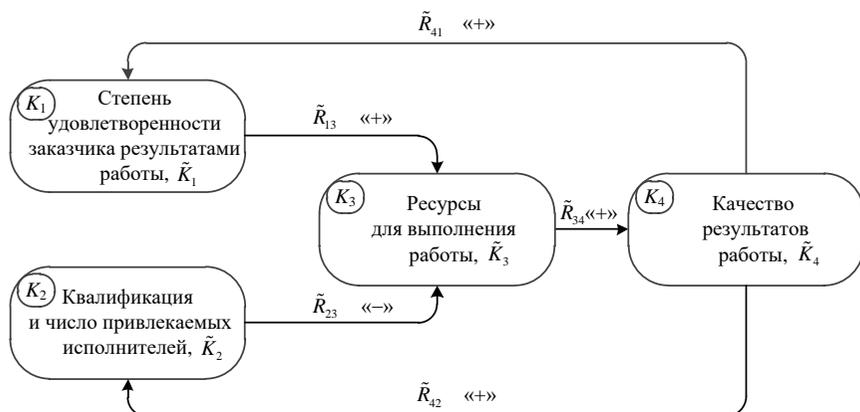


Рис. 1. Пример структуры НРКМ

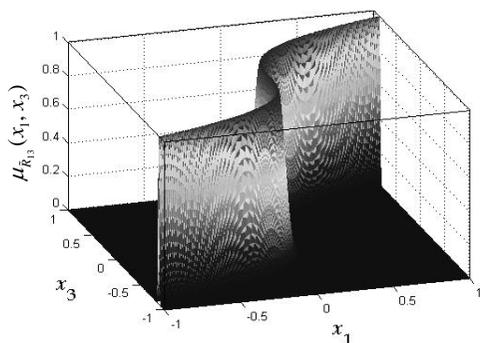


Рис. 2. Вид нечеткого отношения  $\tilde{R}_{13}$

**Гибридные нечеткие когнитивные модели «с функциональным замещением» для анализа сложных систем и процессов (классификация)**  
*Гибридные нечеткие когнитивные модели с параметрической гибридизацией  
(в рамках одной – нечеткой – технологии)*

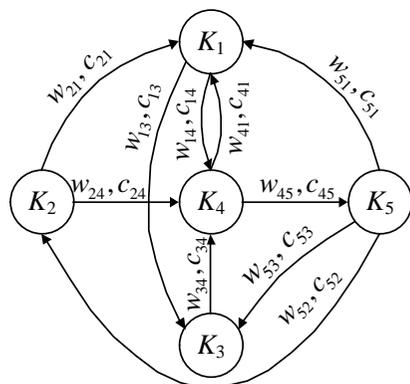
**2) Нечеткие реляционные когнитивные модели (особенности)**

- Предложенные нечеткие реляционные когнитивные модели (и модели системной динамики на их основе) используют устойчивые к возрастанию неопределенности операции над нечеткими числами и отношениями. Это позволяет в процессе моделирования системной динамики решить задачи передачи нечетких влияний по модели и агрегирования нечетких значений концептов с учетом следующих особенностей:
  - сохранение полностью нечеткого представления значений концептов на всех этапах моделирования системной динамики;
  - обеспечение принадлежности результирующих значений и приращений концептов к семейству нечетких чисел;
  - обеспечение невыхода нечетких значений концептов за их носители;
  - обеспечение естественного характера агрегирования.
- Использование предлагаемых моделей системной динамики на основе нечетких реляционных когнитивных позволит повысить достоверность и качество анализа и моделирования проблем, слабоструктурированных систем и процессов в условиях неопределенности.

# Гибридные нечеткие когнитивные модели «с функциональным замещением» для анализа сложных систем и процессов (классификация)

## Гибридные нечеткие когнитивные модели с параметрической гибридизацией (в рамках одной – нечеткой – технологии)

### 3) «Совместимые» нечеткие когнитивные модели (СНКМ)



$$CFCM = (K, W, C),$$

где  $K = \{K_1, \dots, K_N\}$  – концепты;  $W = \{w_{ij}\}$  – веса влияния концептов друг на друга;  $C = \{c_{ij}\}$  – степени совместимости пар концептов,  $i, j = 1, \dots, N$ .

В качестве операций «взвешивания» нечетких влияний концептов (с учетом согласованности) используется параметризованное семейство операций, удовлетворяющее аксиомам нормировки, неубывания, непрерывности, бисимметричности:

$$K_j = \text{med}(K_i, w_{ij}; c_{ij}), \quad i, j \in \{1, \dots, n\}, c_{ij} \in [0, 1].$$

**Рис. 1.** Пример структуры нечеткой «совместимой» когнитивной модели с учетом совместимости концептов:  $K_1$  – «Качество управления»,  $K_2$  – «Оперативность управления»,  $K_3$  – «Надежность управления»,  $K_4$  – «Эффективность управления»,  $K_5$  – «Эффективность системы».

Операция согласованного «взвешивания» нечеткого влияния

$\text{med}(K_i, w_{ij}; 0, 0)$	$\text{med}(K_i, w_{ij}; 0, 25)$	$\text{med}(K_i, w_{ij}; 0, 5)$	$\text{med}(K_i, w_{ij}; 0, 75)$	$\text{med}(K_i, w_{ij}; 1, 0)$
Низкий уровень совместимости	Уровень совместимости ниже среднего	Средний уровень совместимости	Уровень совместимости выше среднего	Высокий уровень совместимости

СНКМ позволяют учесть различную степень совместимости концептов при выборе операций для оценки непосредственного и опосредованного влияния концептов друг на друга.

Пример:  $K_4 = \text{med}\left(\left(\text{med}\left(\left(\text{med}(K_1, w_{14}; c_{14})\right), \left(\text{med}(K_2, w_{24}; c_{24})\right)\right); c_{14}\right), \text{med}(K_3, w_{34}; c_{34}); c_{24}\right)$ .

Предлагаемый подход позволяет учесть совместимость системных факторов для различных типов нечетких когнитивных моделей, повысить гибкость, а в ряде случаев и достоверность результатов нечеткого когнитивного анализа и моделирования.

# Гибридные нечеткие когнитивные модели «с функциональным замещением» для анализа сложных систем и процессов (классификация)

## Гибридные нечеткие когнитивные модели с параметрической гибридизацией (в рамках одной – нечеткой – технологии)

### 4) Нечеткая когнитивно-игровая модель (НКИМ)

$$FCGM = (K, \Delta K),$$

где  $K = \{K_1, K_2, \dots, K_p\}$  – множество концептов, каждому из которых соответствует множество стратегий  $S_{K_i} = \{S_1^{K_i}, \dots, S_z^{K_i}, \dots, S_{Z_i}^{K_i}\}$  ( $Z_i$  – число стратегий концепта  $K_i$ );  $\Delta K = \{\Delta K_{ij}\}$  – множество связей между концептами; состояния концепта  $K_i$  ( $i \in I = \{1, 2, \dots, P\}$ ) описывается лингвистической переменной  $\langle K_i, T_{\tilde{K}_i}, D_{\tilde{K}_i} \rangle$ ,  $T_{\tilde{K}_i} = \{T_1^{\tilde{K}_i}, T_2^{\tilde{K}_i}, \dots, T_{m_i}^{\tilde{K}_i}\}$  – терм-множество лингвистической переменной;  $m_i$  – число типовых состояний данного концепта;  $D_{\tilde{K}_i}$  – базовое множество  $K_i$ ; влияния  $\Delta K_{ij}$  ( $i, j \in I = \{1, 2, \dots, P\}$ ) между типовыми состояниями пар концептов задаются значением терм-множества лингвистической переменной  $\langle \Delta K_{ij}, T_{\Delta \tilde{K}_{ij}}, D_{\Delta \tilde{K}_{ij}} \rangle$ , где  $T_{\Delta \tilde{K}_{ij}} = \{T_{11}^{\Delta \tilde{K}_{ij}}, \dots, T_{zl}^{\Delta \tilde{K}_{ij}}\}$  – терм-множество  $\Delta K_{ij}$ ;  $z \times l$  – число значений  $T_{\Delta \tilde{K}_{ij}}$ ;  $D_{\Delta \tilde{K}_{ij}}$  – базовое множество  $\Delta K_{ij}$ .

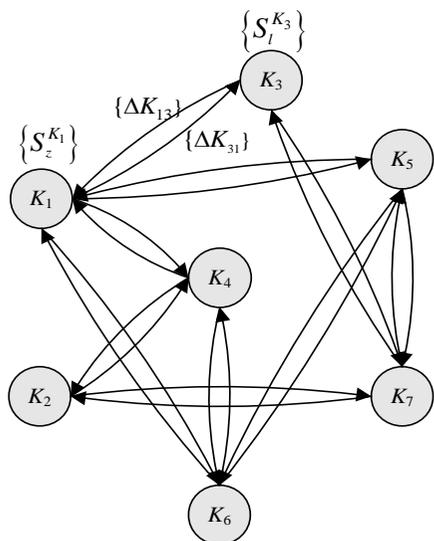
#### Модель системной динамики НКИМ

$$\tilde{K}_i(t+1) = \tilde{K}_i(t) \oplus \left( \bigoplus_{j=1,2,\dots,N} \Delta \tilde{K}(t)_{ij} \right), \quad \Delta \tilde{K}_{ij}(t) = \tilde{f} \left( S_z^{K_i}(t), S_l^{K_j}(t) \right),$$

где  $\Delta \tilde{K}_{ij}(t)$  – нечеткое множество, представляющее текущее изменение значения концепта  $K_i$  в результате влияния  $K_j$ ,  $N$  – число входных концептов для концепта  $K_i$ ;  $\oplus$  – операция нечеткого алгебраического сложения;  $S_x^{K_i}(t)$ ,  $S_y^{K_j}(t)$  – текущие стратегии игроков, представленных концептами  $K_i$  и  $K_j$ ;  $\tilde{f}$  – нечеткий оператор, задающий нечеткое отображение типа «много входов – один выход», и представляющий передачу влияния от концепта  $K_j$  к концепту  $K_i$ . Нечеткий оператор  $\tilde{f}$  в выражении может быть реализован в виде нечетких функций или нечетких продукций:

*Если  $K_i$  придерживается стратегии  $S_z^{K_i}(t)$  И  $K_j$  придерживается стратегии  $S_l^{K_j}(t)$ ,*

*То движение ресурсов  $\Delta \tilde{K}_{ij}(t)$  от  $K_i$  к  $K_j$  составит  $T_{zl}^{\Delta \tilde{K}_{ij}}$ .*



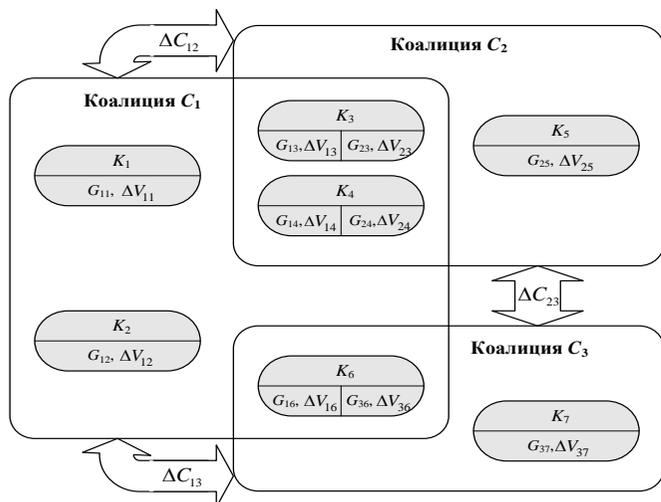
**Рис. 1.** Нечеткая когнитивно-игровая модель

В НКИМ каждому концепту (игроку) соответствует множество стратегий, выбор которых (и результат их применения) зависит от ресурсов, стратегий и предпочтений игроков.

# Гибридные нечеткие когнитивные модели «с функциональным замещением» для анализа сложных систем и процессов (классификация)

## Гибридные нечеткие когнитивные модели с параметрической гибридизацией (в рамках одной – нечеткой – технологии)

### 5) Нечеткая коалиционная когнитивная модель (НККМ)



**Рис. 1.** Нечеткая коалиционная когнитивная модель

НККМ позволяет анализировать различные типы взаимодействия (кооперации, компромисса, содействия и конкуренции) концептов (агентов). Результаты позволяют в динамике (на основе нечеткой игры для произвольного числа игроков) определять и прогнозировать степени принадлежности агентов к различным коалициям, а также их состояние.

$$FCCM = (K, C, G, \Delta C, \Delta V),$$

где  $K = \{K_1, K_2, \dots, K_p\}$  – множество концептов.

Допустим, сформировано множество нечетких коалиций  $C = \{C_1, \dots, C_m, \dots, C_M\}$ . Тогда  $G_m = \{G_{m1}, \dots, G_{mn}, \dots, G_{mP}\}$  – множество степеней принадлежности агентов к коалиции  $C_m$ .

Введение степеней принадлежности агентов к коалициям позволяет учесть то, что игрок может иметь разные цели и в различной степени участвовать в разных коалициях. Для каждой нечеткой коалиции  $C_m$  задается множество  $G_m$ , элементы которого  $G_{mn} \in [0, 1]$  характеризуют степень принадлежности игроков к данной коалиции. Значение  $\Delta V_{mn}$  характеризует выигрыш, который получает агент  $K_m$  от участия в коалиции  $C_m$ .

Значение  $\Delta C_{ml}$  характеризует текущее влияние коалиции  $C_l$  на коалицию  $C_m$  и складывается из влияния участвующих в этих коалициях агентов с учетом степени их принадлежности к коалициям.

Для НККМ предложены коалиционные показатели, позволяющие осуществить анализ различных типов взаимодействия агентов в динамике:

- консонанс/диссонанс влияния агента (концепта) на коалицию;
- консонанс/диссонанс влияния коалиции на агента;
- воздействие (влияние) агента на коалицию;
- воздействие (влияние) коалиции на агента;
- взаимный консонанс/диссонанс влияния агента и коалиции.

# Гибридные нечеткие когнитивные модели «с функциональным замещением» для анализа сложных систем и процессов (классификация)

*Гибридные нечетко-нейросетевые когнитивные модели  
(первый упоминаемый признак – «нечеткие» – является доминирующим,  
а второй – «нейросетевые» – вспомогательным)*

- с представлением концептов в виде искусственных нейронных сетей;
- с параметрической оптимизацией на основе алгоритмов обучения (подобных алгоритмам обучения искусственных нейронных сетей) с использованием обучающих выборок;
- с формированием функций принадлежности нечетких множеств в виде компонентов искусственных нейронных сетей;
- с использованием компонентов искусственных нейронных сетей для фаззификации и дефаззификации переменных.

*Гибридные нечетко-эволюционные когнитивные модели  
(первый упоминаемый признак – «нечеткие» – является доминирующим,  
а второй – «эволюционные/биоинспирированные» – вспомогательным)*

- с реализацией нечетких отношений между концептами модели и их параметрической оптимизацией на основе эволюционных/биоинспирированных алгоритмов.

# Гибридные нечеткие когнитивные модели «с функциональным замещением» для анализа сложных систем и процессов (классификация)

*Гибридные нечетко-нейросетевые когнитивные модели со структурно-параметрической гибридизацией (признак «нечеткие» – доминирующий, «нейросетевые» – вспомогательный)*

## Нечетко-нейросетевые когнитивные темпоральные модели (ННКТМ)

**Представление многомерных временных рядов (МВР) с учетом взаимовлияния компонентов МВР:**

$$S = (S_1, S_2, \dots, S_N), \quad \forall t \in \{1, \dots, T, \dots\} \quad S_t = \begin{cases} s_1^{(t)} = F_1 \left( \varphi_{1,1} \left( s_1^{(t-1)}, \dots, s_1^{(t-L_1^1)} \right), \dots, \varphi_{1,N} \left( s_N^{(t-1)}, \dots, s_N^{(t-L_1^N)} \right) \right), \\ \dots \\ s_N^{(t)} = F_N \left( \varphi_{N,1} \left( s_1^{(t-1)}, \dots, s_1^{(t-L_N^1)} \right), \dots, \varphi_{N,N} \left( s_N^{(t-1)}, \dots, s_N^{(t-L_N^N)} \right) \right) \end{cases}$$

где  $S$  – МВР;  $S_t = (s_1^{(t)}, s_2^{(t)}, \dots, s_N^{(t)})$  – временной «срез» МВР в  $t$ -й момент времени;  $s_j^{(t)}$  – значение  $j$ -го компонента МВР в  $t$ -й момент времени;  $L_j^i$  – максимальное значение временного лага  $j$ -го компонента относительно  $i$ -го;  $\varphi_{i,j}$  – оператор для учета взаимовлияния между  $j$ -м и  $i$ -м компонентами МВР;  $F_i$  – преобразование для получения  $s_i^{(t)}$  с учетом нечетких тенденций  $i$ -го компонента МВР,  $i = 1, \dots, N$ ,  $N$  – число компонентов МВР.

**Формализованная постановка задачи анализа и прогнозирования МВР** предполагает возможность минимизации ошибок прогнозирования одновременно для всех компонентов МВР и представляется следующим образом:

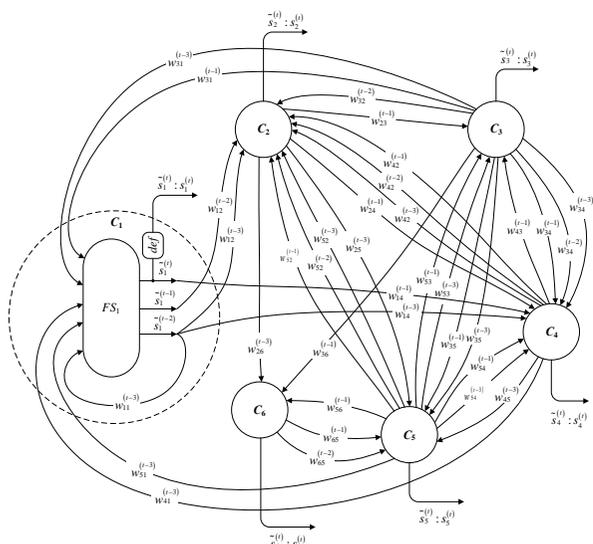
$$\begin{aligned} \delta S &= (\delta S_1, \delta S_2, \dots, \delta S_N), \\ \delta S &\rightarrow \min, \quad \forall i \in 1, \dots, N \quad \delta S_i \rightarrow \min, \\ \delta S_i &= \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (s_i^{(t)} - s_{i(cur)}^{(t)})^2}, \quad i = 1, \dots, N. \end{aligned}$$

где  $\delta S$  – ошибка прогнозирования МВР в целом;  $\delta S_i$  – ошибка прогнозирования  $i$ -го компонента МВР;  $s_i^{(t)}$  – эталонное значение  $i$ -го компонента МВР;  $s_{i(cur)}^{(t)}$  – прогнозное значение  $i$ -го компонента МВР;  $N$  – число отсчетов МВР.

# Гибридные нечеткие когнитивные модели «с функциональным замещением» для анализа сложных систем и процессов (классификация)

## Гибридные нечетко-нейросетевые когнитивные модели с параметрической гибридизацией (признак «нечеткие» является доминирующим, «нейросетевые» – вспомогательным)

### Нечетко-нейросетевые когнитивные темпоральные модели (продолжение)



**Рис. 1.** Структура НККТМ для многомерного прогнозирования состояния городской среды г. Москвы

НККТМ обеспечивает многомерный анализ и учет непосредственного и опосредованного взаимовлияния всех компонентов МВР с их различными временными лагами друг относительно друга, а также их прогнозную оценку в условиях нестохастической неопределенности, нелинейности взаимовлияния, частичной несогласованности и существенной взаимозависимости компонентов МВР.

$$FNCTM = (C, W),$$

$$C = \{C_i \mid i \in 1, \dots, N\}, N = |C|,$$

$$C_i : \tilde{s}_i^{(t)} = F_i(\{(\tilde{s}_j^{(t-1)}, \dots, \tilde{s}_j^{(t-L_i^j)}) \mid j \in 1, \dots, N_i\}), i = 1, \dots, N,$$

$$W = \{W_{ij} \mid i, j \in 1, \dots, N\}, W_{ij} = \{w_{ij}^{(t-l_i^j)} \mid l_i^j = 0, \dots, L_i^j\},$$

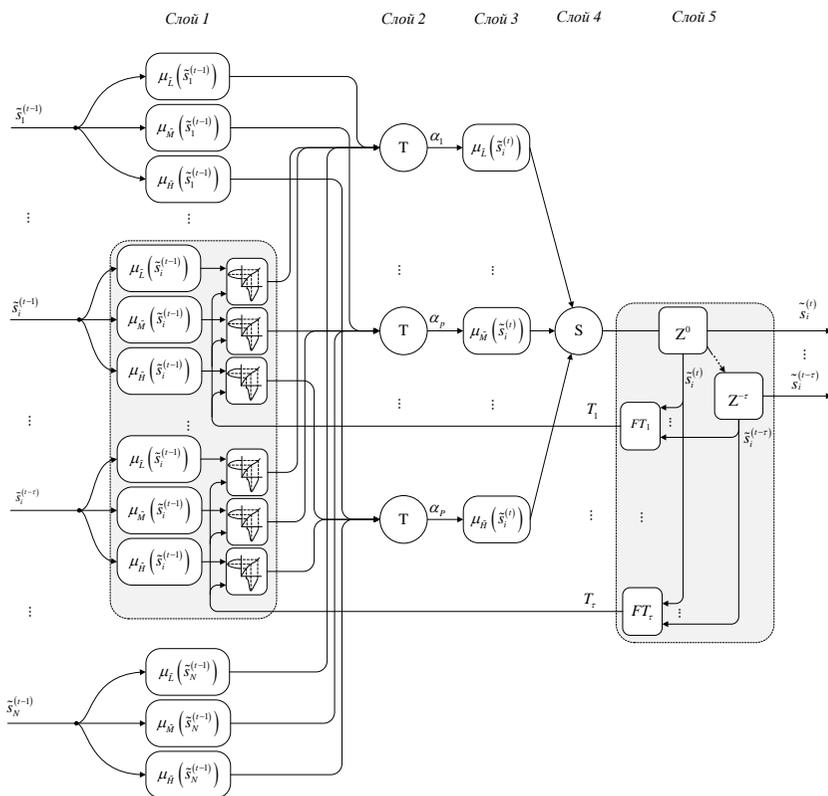
$$s_j^{(t-l_i^j)} = \varphi_{ij}(w_{ij}^{(t-l_i^j)}, s_j^{(t-l_i^j)}), l_i^j = 0, \dots, L_i^j,$$

где  $C$  – множество концептов НККТМ, соответствующих компонентам МВР;  $\tilde{F}_i$  – нечеткое темпоральное преобразование, реализуемое концептом  $C_i$  с учетом нечетких тенденций компонента МВР;  $N$  – число концептов НККТМ;  $\tilde{s}_i^{(t)}$  – прогнозируемое нечеткое значение концепта  $C_i$  в  $t$ -й момент;  $(s_j^{(t-1)}, \dots, s_j^{(t-L_i^j)})$  – подмножество входных темпоральных нечетких переменных концепта  $C_i$ , связанных с выходными переменными концепта  $C_j$ ;  $N_i$  – число концептов НККТМ, связанных с концептом  $C_i$ ;  $l_i^j$  – временной лаг для переменной  $s_j^{(t-l_i^j)}$  концепта  $C_i$ ,  $l_i^j = 0, \dots, L_i^j$ ;  $W$  – множество отношений влияния между парами концептов НККТМ;  $W_{ij}$  – подмножество нечетких значений, определяющее набор нечетких степеней влияния  $w_{ij}^{(t-l_i^j)}$  концепта  $C_j$  на концепт  $C_i$  с учетом лага  $l_i^j$ ;  $\varphi_{ij}$  – нечеткий оператор для учета степени взаимовлияния выходной переменной концепта  $C_j$  на входную переменную концепта  $C_i$ .

# Гибридные нечеткие когнитивные модели «с функциональным замещением» для анализа сложных систем и процессов (классификация)

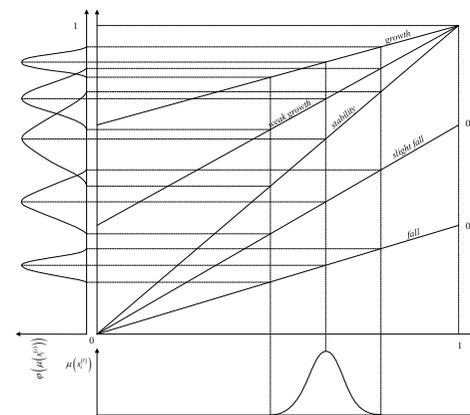
## Гибридные нечетко-нейросетевые когнитивные модели со структурно-параметрической гибридизацией

### Нечетко-нейросетевые когнитивные темпоральные модели (продолжение)

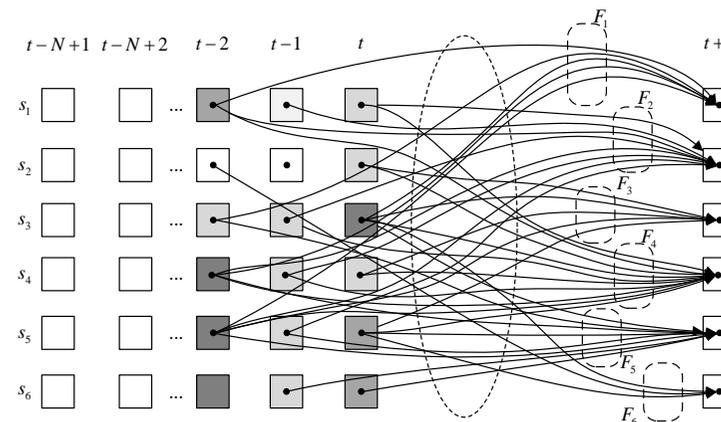


**Рис. 1.** Структура рекуррентной ANFIS-модели (RecANFIS)

RecANFIS-модели адаптивно настраиваются на особенности конкретных ВР в процессе их прогнозирования, автоматически учитывают динамически изменяемые трендовые составляющие ВР и позволяют решать проблему их нестационарности..



**Рис. 2.** Иллюстрация применения нечеткого преобразования для идентификации и учета нечетких тенденций

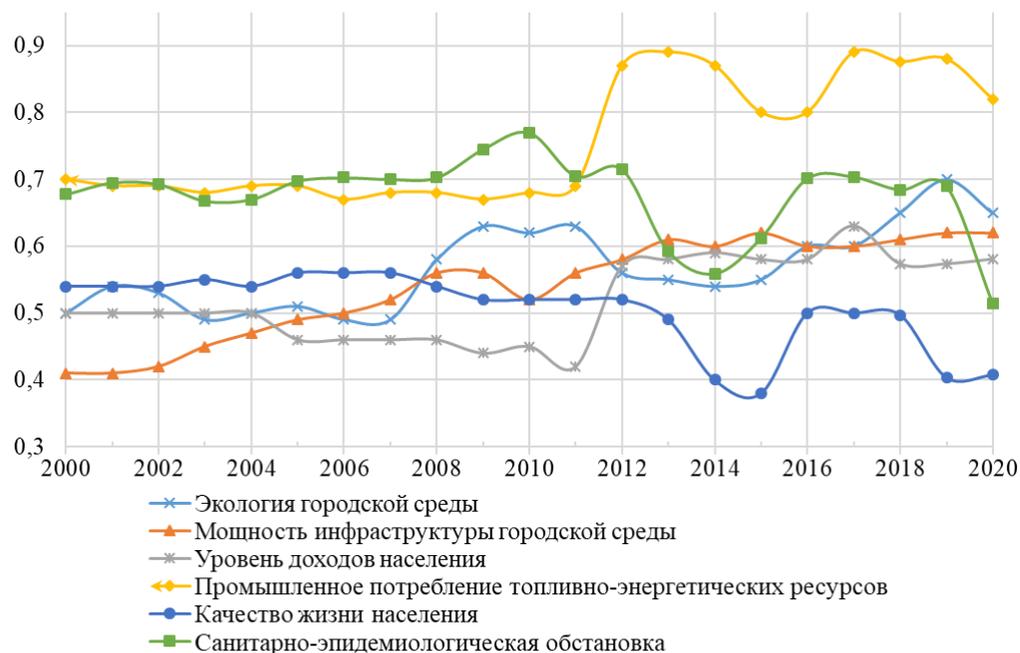


**Рис. 3.** Схема многомерного прогнозирования состояния городской среды г. Москвы на основе ННКТМ

# Гибридные нечеткие когнитивные модели «с функциональным замещением» для анализа сложных систем и процессов (классификация)

## Гибридные нечетко-нейросетевые когнитивные модели со структурно-параметрической гибридизацией

### Нечетко-нейросетевые когнитивные темпоральные модели (продолжение)



**Рис. 1.** Иллюстрация результатов многомерного прогнозирования состояния городской среды г. Москвы на основе НККТМ

**Табл. 1**

Сравнительная характеристика ошибок прогнозирования МВР между ИНС и НККТМ

№	Компоненты МВР	Ошибка прогнозирования, MAPE, %	
		ИНС	НККТМ
1.	Экология городской среды	7,40	6,91
2.	Мощность инфраструктуры городской среды	1,51	0,13
3.	Уровень жизни населения	8,72	9,85
4.	Промышленное потребление топливно-энергетических ресурсов	2,35	1,62
5.	Качество жизни населения	2,12	0,55
6.	Санитарно-эпидемиологическая обстановка	5,35	5,31

# Композиционные гибридные нечеткие модели «с взаимодействием» для комплексных задач анализа систем и процессов (метод)

## *Метод создания композиционных гибридных нечетких моделей*

**Этап 1.** Декомпозиция комплексной задачи в виде совокупности частных задач (методами системного анализа, анализа сложных систем и процессов и др.).

**Этап 2.** Классификация нечетких моделей на универсальные (продукционные, реляционные, функциональные) и проблемно-ориентированные (функциональные и реляционные оценочные модели; модели событий; модели состояний и управления), а также конкретизация их возможностей по соответствию к требованиям частных задач (в соответствии с: предметом анализа; типом динамики; типом неопределенности; методом получения данных).

**Этап 3.** Определение требований к моделям для выполнения каждой из частных задач (каждой из частных задач может быть сопоставлено или несколько групп требований к нечетким моделям).

**Этап 4.** Определение совокупностей нечетких моделей для выполнения частных задач (на основании сопоставления групп требований со стороны частных задач к нечетким моделям определяются совокупности моделей, образующие «дерево покрытия» комплексной задачи).

**Этап 5.** Выбор подмножества нечетких моделей, наиболее рационально реализующих комплексную задачу, т.е. обеспечивающих «покрытие» комплексной задачи в соответствии с возможными критериями рационального выбора, например, максимизацией степени пригодности модели, максимизацией минимальной пригодности, максимизации средней пригодности, минимизации мощности «покрытия».

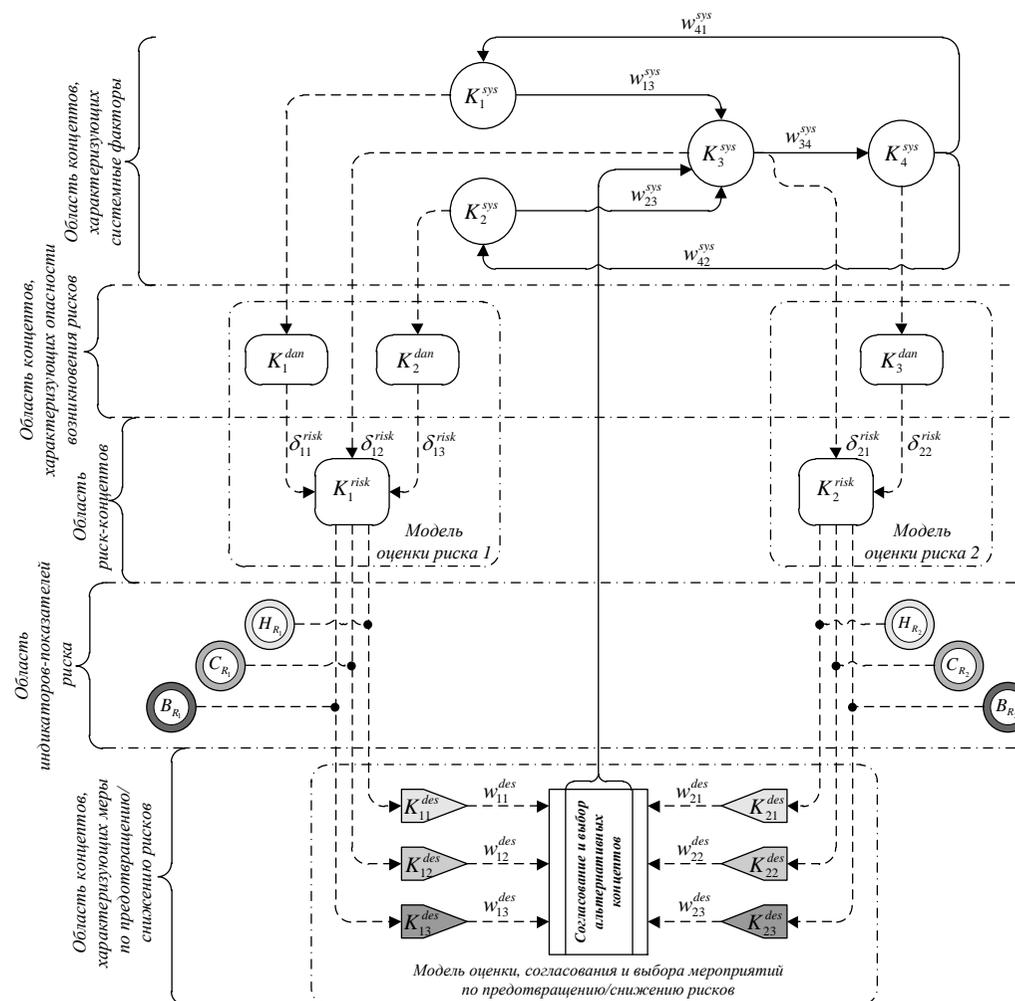
# Композиционные гибридные нечеткие модели «с взаимодействием» для комплексных задач анализа систем и процессов (примеры)

## Пример 1. Композиционная гибридная нечеткая модель для управления профессиональными рисками

Основой этой композиционной гибридной нечеткой модели является нечеткая когнитивная модель, предназначенная для оценки взаимодействия системных факторов.

Для оценки профессиональных рисков служат нечеткие продукционные модели, а для согласования и выбора мероприятий по предотвращению/снижению рисков – нечеткие байесовские модели.

Рис. 1. Структура композиционной гибридной нечеткой модели для управления профессиональными рисками





# Композиционные гибридные нечеткие модели «с взаимодействием» для комплексных задач анализа систем и процессов (примеры)

## Пример 3. Композиционная гибридная нечеткая модель для мониторинга и управления техногенными рисками на предприятиях электронной отрасли (ПЭО)

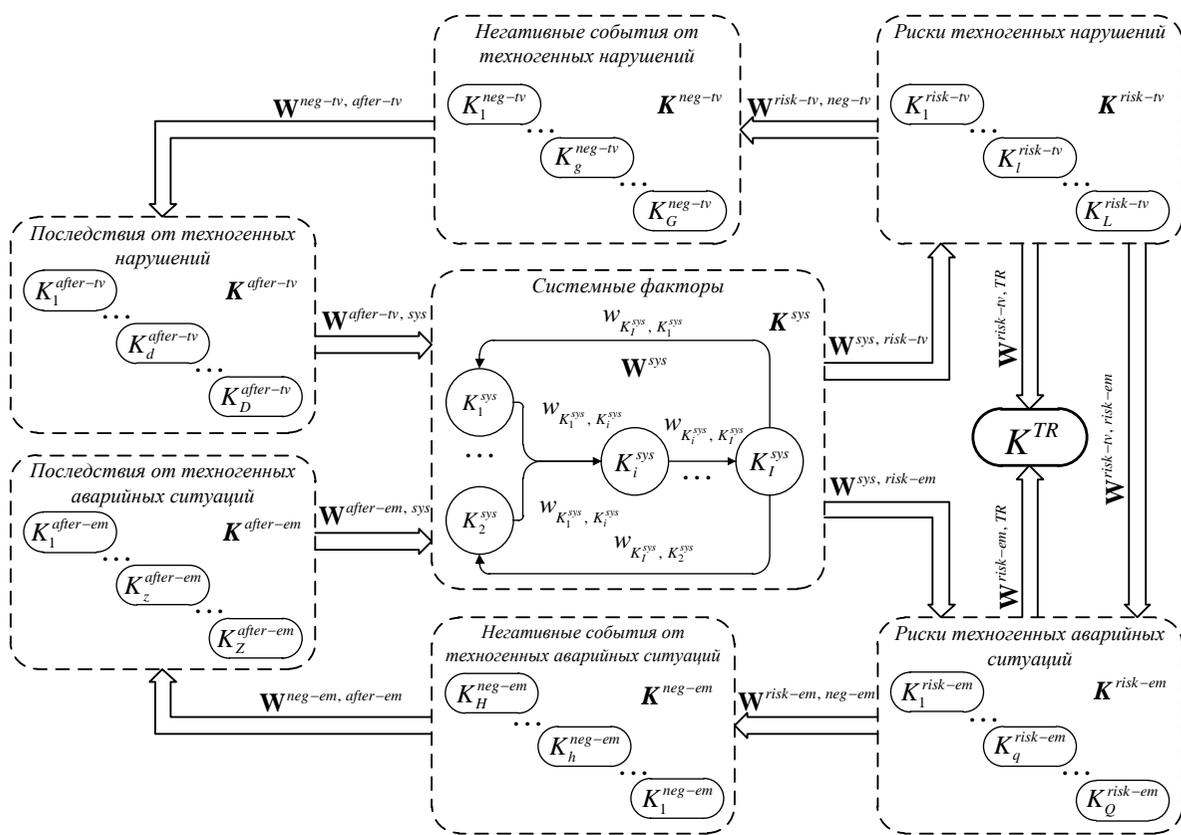


Рис. 1. Структура обобщенной нечеткой когнитивной модели для анализа проблемы мониторинга и управления техногенными рисками на ПЭО

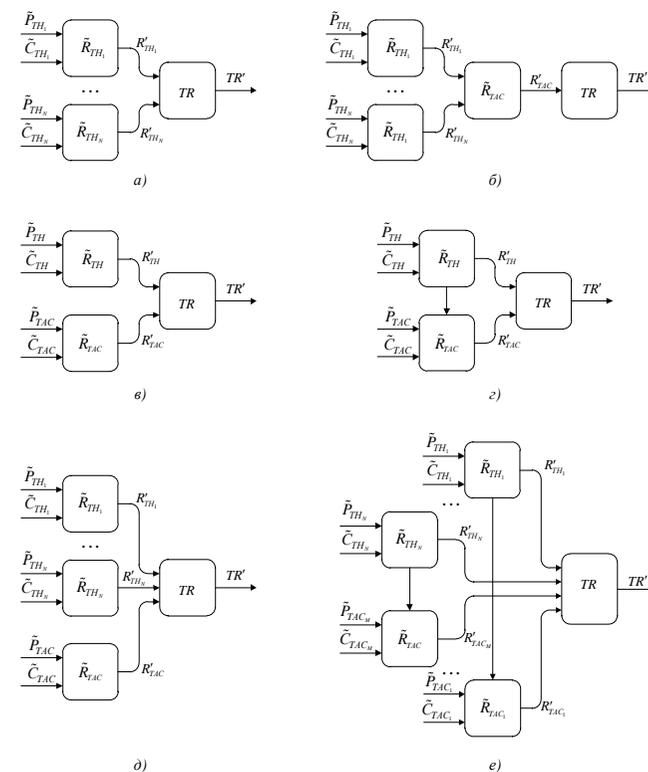
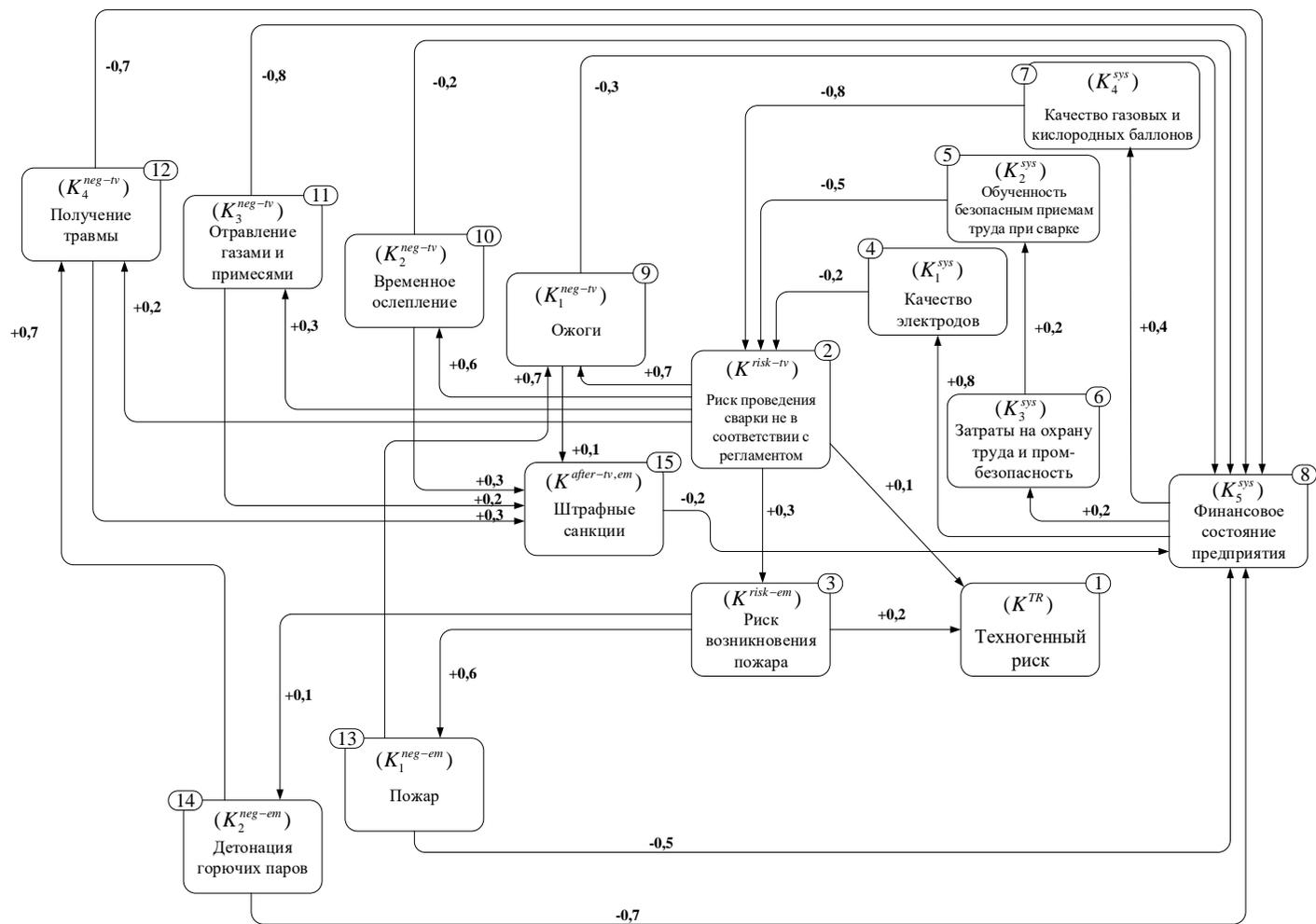


Рис. 2. Структуры нечетких моделей для различных вариантов оценки влияния рисков техногенных нарушений и аварийных ситуаций на техногенный риск ПЭО

# Композиционные гибридные нечеткие модели «с взаимодействием» для комплексных задач анализа систем и процессов (примеры)

## Пример 3. Композиционная гибридная нечеткая модель для мониторинга и управления техногенными рисками на предприятиях электронной отрасли (продолжение)



**Рис. 1.** Нечеткая когнитивная модель оценки техногенных рисков для процесса сварки изделий электронной промышленности

# Композиционные гибридные нечеткие модели «с взаимодействием» для комплексных задач анализа систем и процессов (примеры)

## Пример 4. Композиционная гибридная нечеткая модель оценки энерго- и ресурсосбережения в социотехнических системах (СТС)

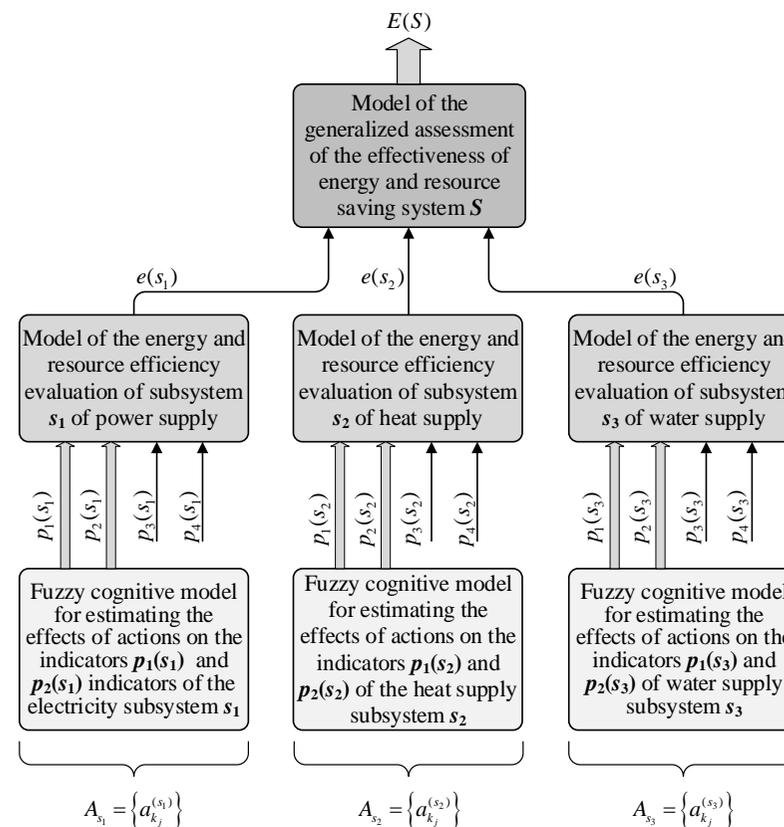
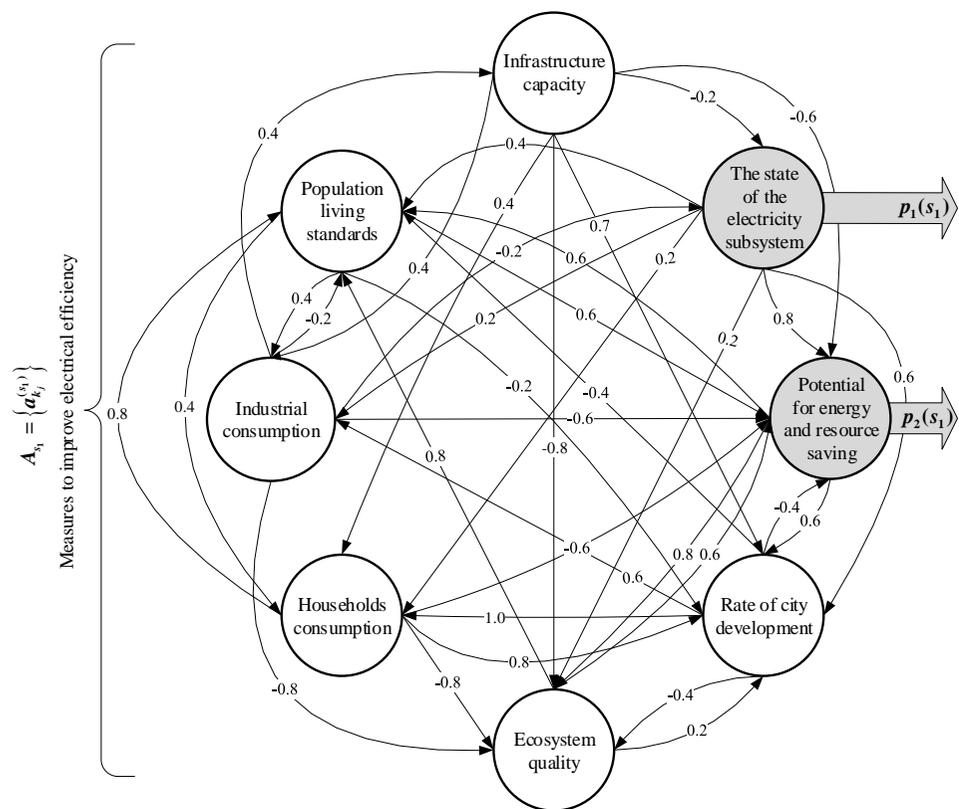


Рис. 1. Нечеткая когнитивная модель оценки воздействия мероприятий  $a_{k_j}^{(s_1)} \in A_{s_1}$  на показатели  $p_1(s_1)$  и  $p_2(s_1)$  подсистемы  $s_1$

Рис. 2. Структура композиционной гибридной нечеткой модели оценки энерго- и ресурсосбережения в (СТС)

# Композиционные гибридные нечеткие модели «с взаимодействием» для комплексных задач анализа систем и процессов (примеры)

## Пример 5. Композиционная гибридная нечеткая модель для анализа взаимовлияния факторов и оценки готовности формирований МЧС

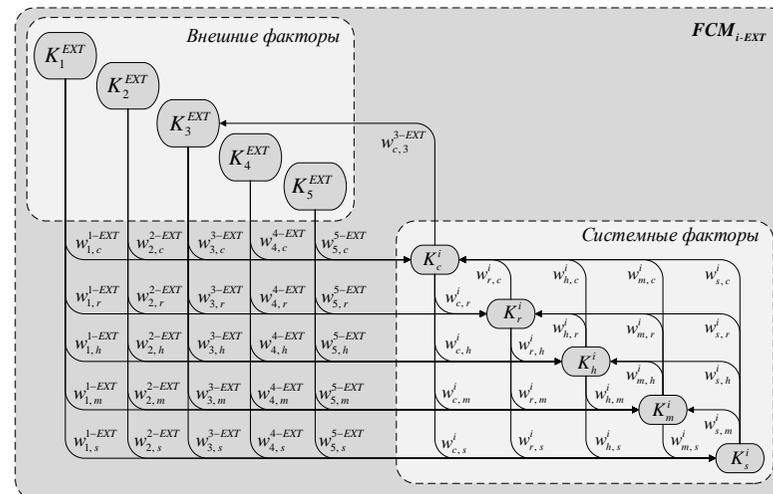
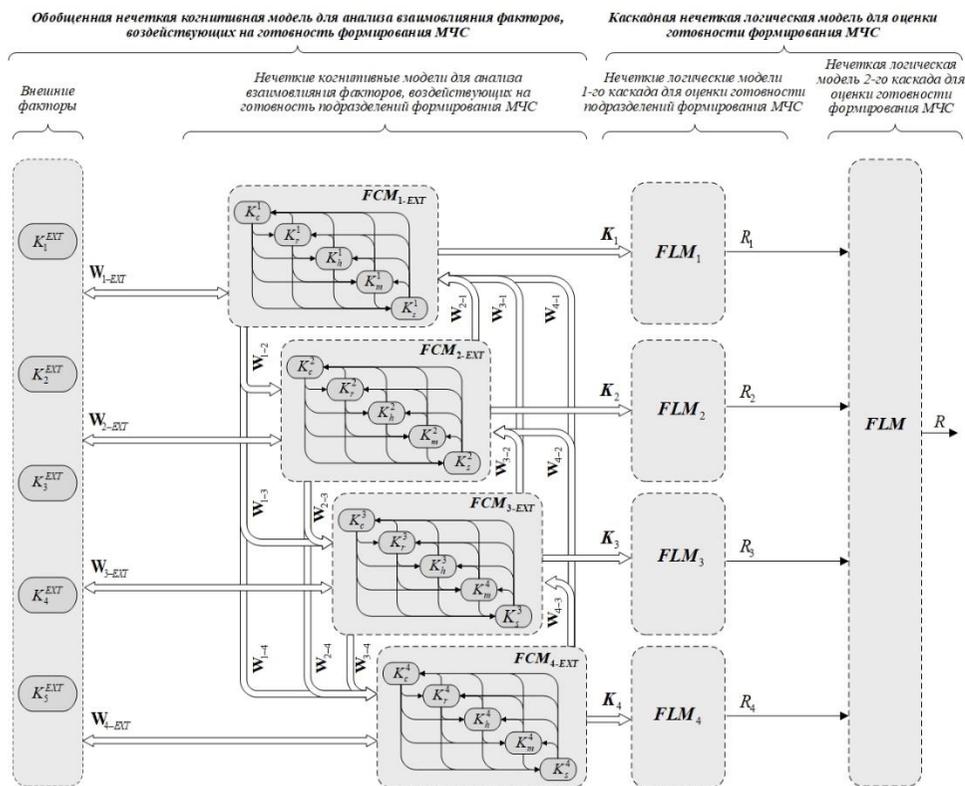


Рис. 2. Детализированный пример взаимовлияния внешних факторов и концептов нечеткой когнитивной модели  $FCM_{i-EXT}$

Рис. 1. Структура композиционной гибридной нечеткой модели для анализа взаимовлияния факторов и оценки готовности формирования МЧС

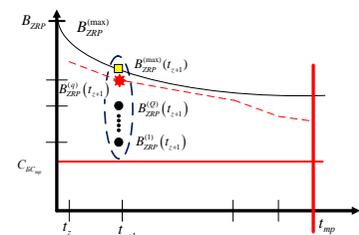


Рис. 3. Моделирование динамики и выбор мероприятий по повышению готовности формирования МЧС

## Заключение

Представлены подходы к использованию нечетких когнитивных моделей для исследования сложных систем и процессов.

Первый подход заключается в использовании нечетких когнитивных моделей для предварительного анализа сложных систем и проблемных ситуаций, результаты которого относительно независимо используются для последующего, более углубленного исследования.

Второй подход заключается в замене или усовершенствовании отдельных компонентов нечетких когнитивных моделей компонентами других моделей, позволяющих, таким образом, расширить возможности и улучшить свойства базовых моделей.

Третий подход базируется на построении композиционных гибридных нечетких моделей, в которых компонентные нечеткие модели используются относительно независимо и выполняют различные задачи по достижению общей цели. Данный подход в наибольшей степени востребован для выполнения комплексных задач анализа систем и процессов, для которых возможна их декомпозиция на отдельные подзадачи, соответствующие подсистемам, объектам, стадиям их процессов.

Приведены конструктивные примеры реализации рассмотренных подходов к использованию нечетких когнитивных моделей для исследования сложных систем и процессов.