

С.А. Федулова**ПРИМЕНЕНИЕ МЯГКИХ СИТУАЦИОННО-КОГНИТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ
ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ
И ПРОЦЕССАМИ**

В настоящее время востребованным является создание методов и технологий интеллектуального управления сложными системами и процессами, которые учитывают ситуационную осведомленность о решаемых проблемах, различные стратегии управления и сценарии достижения целевых ситуаций в условиях неопределенности различного типа. В наибольшей степени специфику ситуационной осведомленности при управлении такими системами и процессами учитывают модели и методы, основанные на нечетком ситуационном и нечетком когнитивном подходах. Однако ограничениями известных нечетких ситуационных моделей (НСМ) и основанных на этих моделях методов при управлении сложными системами и процессами в условиях неопределенности, является: сложность учета взаимовлияния ситуационных признаков, приводящая к неоднозначности переходов из одной нечеткой ситуации в другую при воздействии соответствующих управляющих решений; сложность оценки одновременного воздействия нескольких управляющих решений на различные взаимозависимые ситуационные признаки; недостаточный учет фактора времени и продолжительности воздействия управляющих решений на ситуационные признаки; сложность задания и моделирования сценарной динамики НСМ с учетом различных стратегий управления. В данной статье рассмотрены вопросы применения новой предложенной разновидности мягких ситуационно-когнитивных моделей (МСКМ), в которых результаты нечеткого когнитивного моделирования используются для оценки степени и времени воздействия управляющих решений на взаимозависимые ситуационные признаки НСМ. За счет этого формируется наилучшая, в зависимости от выбранной стратегии, последовательность управляющих решений, и обосновывается время их применения. В качестве примера рассмотрено интеллектуальное управление турбокомпрессорными воздушными установками (ТВУ) на основе применения предлагаемых МСКМ. Проведены экспериментальные исследования, получены результаты сравнительной оценки, которые позволяют обосновать повышение качества интеллектуального управления и эффективности функционирования ТВУ в условиях неопределенности с использованием МСКМ для различных стратегий управления и сценариев достижения целевых ситуаций.

Мягкая ситуационно-когнитивная модель; композитная гибридная модель; интеллектуальное управление; стратегия управления.

S.A. Fedulova**APPLICATION OF SOFT SITUATIONAL-COGNITIVE MODELS
FOR INTELLIGENT CONTROL OF COMPLEX SYSTEMS AND PROCESSES**

Currently, it is in demand to design methods and technologies for intelligent control of complex systems and processes that take into account situational awareness of problems, various control strategies and scenarios for achieving target situations in conditions of uncertainty. Models and methods based on fuzzy situational and fuzzy cognitive approaches take into account the specifics of situational awareness when controlling such systems and processes. The limitations of fuzzy situational models in controlling complex systems and processes under conditions of uncertainty are: the difficulty of accounting for the mutual influence of situational features due to the ambiguity of transitions from one fuzzy situation to another; the difficulty of assessing the simultaneous impact of several control decisions on various interdependent situational features; insufficient consideration of the time factor and duration of the impact of situational decisions on situational features; the difficulty of modeling scenario dynamics taking into account various strategies. Due to this, the best sequence of control decisions is formed, depending on the chosen strategy, and the time of their application is justified. The paper discusses the application of a new proposed variety of Soft Situational-Cognitive Models for intelligent control of turbocharger air installations. The results of the comparative assessment make it possible to substantiate the improvement of the quality of intelligent control and the efficiency of turbocharger air installations in conditions of uncertainty using the proposed model for various control strategies and scenarios for achieving target situations.

Soft situational-cognitive model; composite hybrid model; intelligent control; control strategy.

Введение. В настоящее время востребованным является создание методов и технологий интеллектуального моделирования и управления сложными системами, учитывающих ситуационную осведомленность о процессах управления, различные стратегии управления и сценарии достижения целевых ситуаций в условиях неопределенности. Известны различные подходы и методы интеллектуального управления такими системами и процессами, использующие, прежде всего, возможности: нечетких, нейросетевых, нейро-нечетких и нечетко-нейросетевых моделей [1]; эволюционных методов и генетических алгоритмов [2, 3]; моделей биоэвристик, основанных на физических и когнитивных процессах [4]; методов роевого интеллекта [5, 6]; методов теории принятия решений [7].

В наибольшей степени специфику ситуационной осведомленности при управлении сложными системами и процессами в зависимости от различных стратегий и сценариев достижения целевых ситуаций в условиях неопределенности учитывают модели и методы, основанные на нечетком ситуационном подходе.

Вопросы использования нечеткого ситуационного подхода в задачах интеллектуального управления представлены в работах [8–15].

Ограничениями известных нечетких ситуационных моделей (НСМ) при управлении сложными системами и процессами в условиях неопределенности, является:

- ♦ сложность учета взаимовлияния ситуационных признаков друг на друга, приводящая к неоднозначности переходов из одной нечеткой ситуации в другую при воздействии соответствующих управляющих решений;
- ♦ сложность оценки одновременного воздействия нескольких управляющих решений на различные взаимозависимые ситуационные признаки;
- ♦ недостаточный учет фактора времени и продолжительности воздействия ситуативных решений на ситуационные признаки;
- ♦ сложность задания и моделирования сценарной динамики НСМ с учетом различных поведенческих стратегий.

В работе [16] предложены мягкие ситуационно-когнитивные модели (МСКМ), в которых результаты нечеткого когнитивного моделирования используются для оценки степени и времени воздействия управляющих решений на зависимые ситуационные признаки НСМ.

В данной работе рассмотрены вопросы применения предложенных МСКМ для интеллектуального управления сложными системами и процессами на примере турбокомпрессорной воздушной установки (ТВУ), для которой предъявляются повышенные требования к качеству управления, энерго- и ресурсозатратности, безопасности эксплуатации.

Мягкая ситуационно-когнитивная модель для интеллектуального управления ТВУ. Большой объем данных, накопленных в ходе эксплуатации и испытаний ТВУ, позволяет обеспечить достоверность сравнительной оценки качества управления и эффективности функционирования этих установок с использованием существующего и предлагаемого научно-методического, алгоритмического и программного обеспечения.

Оценка качества управления и эффективности функционирования ТВУ с применением разработанной МСКМ проводилась на основе экспериментальных данных, полученных с использованием экспериментального центробежного компрессора ЭЦК-55 с мощностью электропривода 55 кВт, предназначенного для проведения разгонных и газодинамических испытаний центробежных модельных компрессорных ступеней, определения их газодинамических характеристик КПД, отношения давлений, коэффициента внутреннего напора [11].

Для компьютерного моделирования ТВУ использована разработанная композитная гибридная модель, структура которой показана на рис. 1. В табл. 1 представлен набор компонентных моделей, использованных для представления взаимосвязанных компонентов ТВУ и построения композитной гибридной модели ТВУ [11].

Ранее в работах [11, 17, 18] была обоснована достоверность результатов моделирования процессов управления ТВУ на основе использования отдельных разработанных компонентных моделей, а также композитной гибридной модели ТВУ.

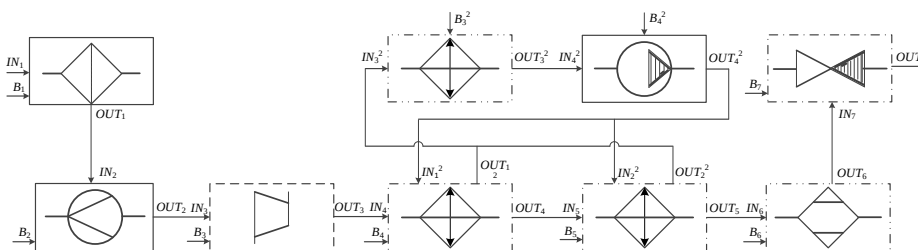
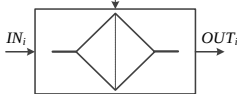
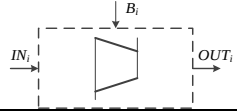
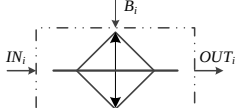
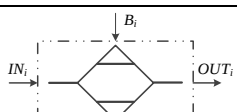
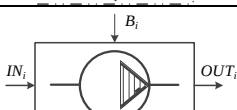
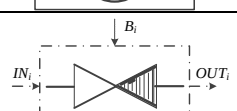
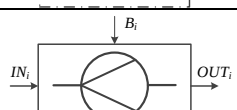


Рис. 1. Структура композитной гибридной модели ТВУ [11]

Таблица 1 [11]

Компоненты ТВУ	Тип компонентной модели	Графическое обозначение компонентной модели
Воздуходувный фильтр	Аналитическая модель с четкими параметрами	
Компрессор	Нейросетевая модель	
Теплообменник (охладитель)	Нечетко-логическая модель	
Водоотделитель (осушитель воздуха)	Нечетко-логическая модель	
Насос	Аналитическая модель с четкими параметрами	
Обратный антипомпажный клапан	Нечетко-логическая модель	
Расходомер	Аналитическая модель с четкими параметрами	

Зададим ситуационные признаки МСКМ для интеллектуального управления ТВУ:

$$P = \{P_i \mid i \in 1, \dots, I\}, \quad P_i = \langle T_i, D_i \rangle, \quad \forall i \in 1, \dots, I,$$

где $T_i = \{T_1^{(i)}, T_2^{(i)}, \dots, T_{J_i}^{(i)}\}$ – терм-множество для описания значений ситуационного признака P_i ; J_i – число термов ситуационного признака P_i ; D_i – базовое множество нечетких значений ситуационного признака P_i .

В качестве нечетких ситуационных признаков для управления ТВУ определены:

- ◆ P_1 – давление сжатого газа на выходе компрессора,
 $T_{P_1} = \{T_1^{(P_1)} - \text{малое}, T_2^{(P_1)} - \text{среднее}, T_3^{(P_1)} - \text{большое}\}$, $D_{P_1} = [0; 506, 63]$ кПа;
- ◆ P_2 – температура сжатого газа на выходе компрессора,
 $T_{P_2} = \{T_1^{(P_2)} - \text{малая}, T_2^{(P_2)} - \text{средняя}, T_3^{(P_2)} - \text{большая}\}$, $D_{P_2} = [0; 250]$ °C;

- ♦ P_3 – расход (скорость движения) сжатого газа,
 $T_{P_3} = \{T_1^{(P_3)} - \text{малый}, T_2^{(P_3)} - \text{средний}, T_3^{(P_3)} - \text{большой}\}$, $D_{P_3} = [0; 25] \text{ м/с}$;
- ♦ P_4 – влажность газа на выходе водоотделителя,
 $T_{P_4} = \{T_1^{(P_4)} - \text{малая}, T_2^{(P_4)} - \text{средняя}, T_3^{(P_4)} - \text{большая}\}$, $D_{P_4} = [0; 80] \%$;
- ♦ P_5 – давление газа перед выдачей потребителю,
 $T_{P_5} = \{T_1^{(P_5)} - \text{малое}, T_2^{(P_5)} - \text{среднее}, T_3^{(P_5)} - \text{большое}\}$, $D_{P_5} = [0; 456] \text{ кПа}$;
- ♦ P_6 – температура газа на выходе охладителей,
 $T_{P_6} = \{T_1^{(P_6)} - \text{малая}, T_2^{(P_6)} - \text{средняя}, T_3^{(P_6)} - \text{большая}\}$, $D_{P_6} = [0; 90] \text{ }^\circ\text{C}$.

На основании сочетаний термов ситуационных признаков сформировано множество эталонных нечетких ситуаций $Se = \{Se_q \mid q \in 1, \dots, 729\}$ ситуационной сетевой структуры МСКМ для управления ТВУ:

$$\forall q \in 1, \dots, 729 \quad \tilde{Se}_q = \left\{ \left\langle \mu_q(\tilde{P}_i) / P_i \right\rangle \mid i \in 1, \dots, 6, \tilde{P}_i = \left\{ \mu_i(T_j^{(P)}) / T_j^{(P)} \mid j \in 1, \dots, J_i \right\} \right\},$$

при условии: $\exists! \mu_i(T_j^{(P)}) = 1, \quad \forall l \neq i \quad \mu_l(T_j^{(P)}) = 0$.

На значения ситуационных признаков эталонных нечетких ситуаций $Se_1, \dots, Se_{729}$ воздействуют управляющие решения $G = \{G_{ik} \mid i \in 1, \dots, I, k \in 1, \dots, K_i\}$.

Каждое управляющее решение $G_{P,k}$, воздействующее на P_i , представляется в виде:

$$G_{P,k} = \langle Tg_{P,k}, Eg_{P,k}, Dg_{P,k} \rangle,$$

где $Tg_{P,k} = \{\langle \text{«Увеличить»}, \langle \text{«Уменьшить»}, \langle \text{«Не изменять»} \rangle\}$ – терм-множество направления $G_{P,k}$; $Eg_{P,k} = \{\langle \text{«Слабо»}, \langle \text{«Средне»}, \langle \text{«Сильно»} \rangle\}$ – терм-множество силы $G_{P,k}$; $Dg_{P,k}$ – шкала силы $G_{P,k}$.

Так, для управления ТВУ заданы $G_{P,1}, \dots, G_{P,7}$: $G_{P,1}$ – «Слабо уменьшить значение ситуационного признака P_i »; $G_{P,2}$ – «Средне уменьшить значение ситуационного признака P_i »; $G_{P,3}$ – «Сильно уменьшить значение ситуационного признака P_i »; $G_{P,4}$ – «Не изменять значение ситуационного признака P_i »; $G_{P,5}$ – «Слабо увеличить значение ситуационного признака P_i »; $G_{P,6}$ – «Средне увеличить значение ситуационного признака P_i »; $G_{P,7}$ – «Сильно увеличить значение ситуационного признака P_i ».

При этом воздействие $G_{P,k}$ на P_i представляется нечетким отношением $\tilde{G}_{P,k}$ и реализуется в виде нечеткой max-min-композиции:

$$\tilde{P}'_i = \tilde{P}_i \circ \tilde{G}_{P,k}.$$

На рис. 2 представлена сформированная эталонная ситуационная сетевая структура МСКМ для интеллектуального управления ТВУ.

Построена когнитивная сетевая структура (рис. 3), концепты которой соответствуют ситуационным признакам эталонной ситуационной сетевой структуры МСКМ для управления ТВУ

$$C = \{C_i \mid i \in 1, \dots, I\}, \quad C_i = \langle T_i, D_i \rangle, \quad \forall i \in 1, \dots, 6,$$

где C – множество концептов C_i когнитивной сетевой структуры; $T_i = \{T_1^{(i)}, T_2^{(i)}, \dots, T_{J_i}^{(i)}\}$ – терм-множество значений концепта C_i , соответствующее терм-множеству P_i ; J_i – число термов концепта C_i , соответствующее числу термов P_i ; D_i – базовое множество нечетких значений концепта C_i , соответствующее базовому множеству нечетких значений P_i .

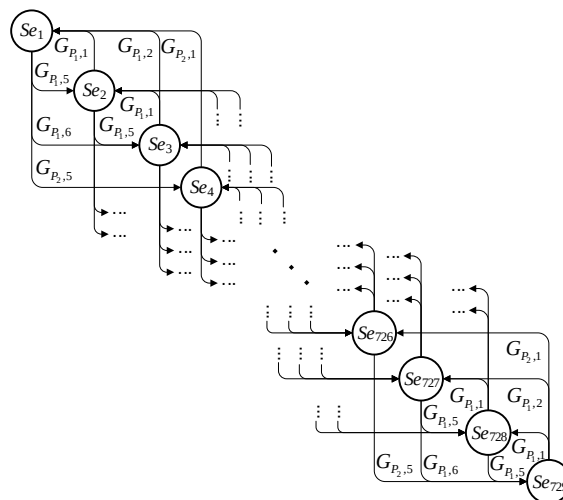


Рис. 2. Эталонная ситуационная сетевая структура МСКМ для интеллектуального управления ТВУ

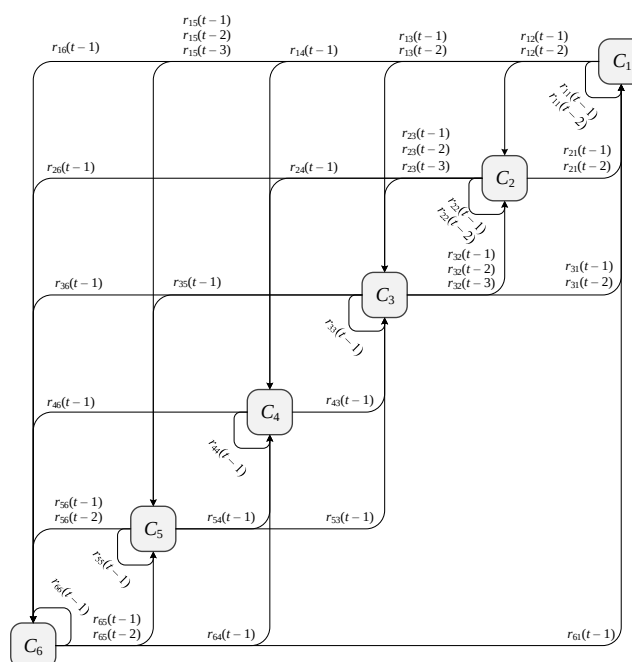


Рис. 3. Когнитивная сетевая структура МСКМ

Отношения влияния концептов друг на друга определены следующим образом:

$$R = \{R_i \mid i = 1, \dots, 6\}, \quad R_i = \{\tilde{r}_{ij}^*(t-l) \mid l = 0, \dots, L_j^i, j = 1, \dots, J^i\},$$

где R – множество нечетких отношений взаимовлияния концептов; R_i – подмножество нечетких отношений влияния концептов, воздействующих на концепт C_i ; J^i – число концептов, прямо воздействующих на концепт C_i ; $\tilde{r}_{ij}(t-l)$ – нечеткое отношение влияния C_j на C_i в момент $(t-l)$; L_j^i – максимально значимое значение временного лага при влиянии C_j на C_i .

Из рассмотрения исключены нечеткие отношения влияния $\tilde{r}_{ij}(t-l)$, модальные значения которых меньше 0,3 [16].

Для моделирования сценарной динамики для всех концептов когнитивной сетевой структуры МСКМ использовано выражение [16]:

$$\tilde{C}_i(t) = \tilde{C}_i(t-1) \oplus \left(\bigoplus_{m=1}^{L_i} \left(\Delta \tilde{C}_i(t-m) \otimes \tilde{r}_{ii}(t-m) \right) \right) \oplus \left(\bigoplus_{j=1}^{J_i} \left(\bigoplus_{l=1}^{L_j} \left(\Delta \tilde{C}_j(t-l) \otimes \tilde{r}_{ij}(t-l) \right) \right) \right).$$

Сценарное моделирование выполнялось с использованием построенной когнитивной сетевой структуры МСКМ (в соответствии с вышеприведенной эталонной ситуационной сетевой структурой МСКМ) при воздействии соответствующих управляющих решений на все ее концепты (фактически, на ситуационные признаки эталонных ситуаций). Всего было выполнено 4370 эпох сценарного моделирования, по результатам которых было получено множество промежуточных ситуаций $Str = \{Str_m \mid m \in 1, \dots, 1200\}$.

Затем в результате группирования эталонных и промежуточных ситуаций с учетом порога нечеткой близости $d_{thr} \geq 0,8$ нечетких ситуаций сформировано множество фактических ситуаций $Sf = \{Sf_k \mid k \in 1, \dots, 350\}$.

Для каждой фактической ситуации определены матрицы комбинированных нечетких отношений $\tilde{G}_{Sf_k, Sf_l}^*$, задающие фактические управляющие решения G_{Sf_k, Sf_l}^* , ($G^* = \{G_{Sf_k, Sf_l}^* \mid k \in 1, \dots, 350, l \in 1, \dots, L_k\}$), max-min-композиции которых с матрицами нечетких значений ситуационных признаков исходных фактических ситуаций Sf_k приводят к соответствующим результирующим фактическим ситуациям Sf_l ($\forall Sf_k, Sf_l \in Sf$).

В результате сформирована фактическая ситуационная сетевая структура МСКМ для интеллектуального управления ТВУ, фрагмент которой представлен на рис. 4.

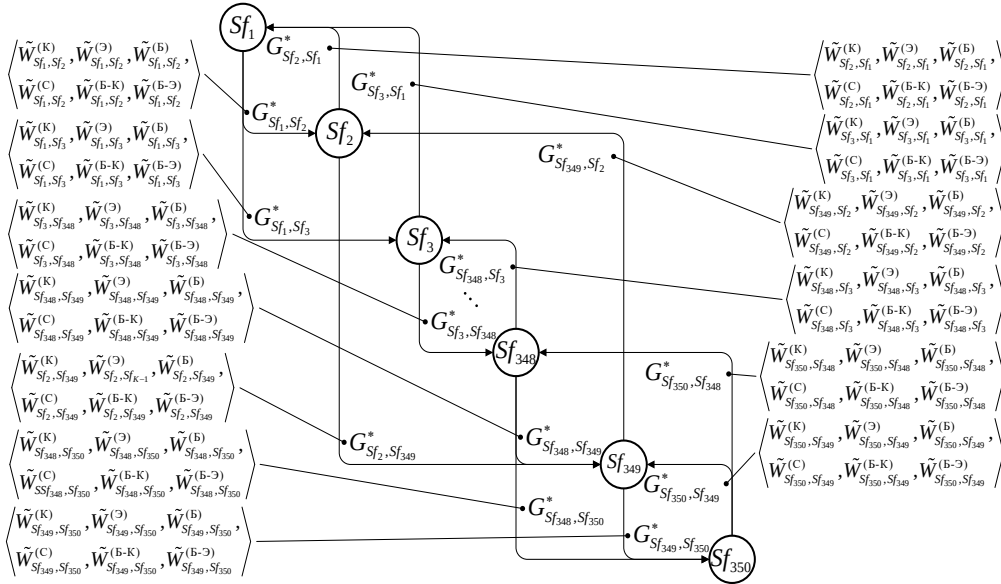


Рис. 4. Фрагмент фактической ситуационной сетевой структуры МСКМ для интеллектуального управления ТВУ

Экспериментальные исследования, результаты сравнительной оценки качества интеллектуального управления и эффективности функционирования ТВУ с использованием МСКМ. Разработаны программные средства для построения, настройки и

применения МСКМ ([19, 20]), с использованием которых проведено компьютерное моделирование и выполнена сравнительная оценка качества управления и эффективности функционирования ТВУ.

Экспериментальные исследования интеллектуального управления ТВУ на основе МСКМ включали в себя осуществление следующих этапов компьютерного моделирования: во-первых, идентификацию текущей ситуации ТВУ в соответствии с построенной фактической ситуационной сетевой структурой МСКМ; во-вторых, задание целевой ситуации из фактической ситуационной сетевой структуры МСКМ; в-третьих, выбор стратегии управления для достижения целевых ситуаций в ситуационной сетевой структуре МСКМ; в-четвертых, формирование последовательностей управляющих решений в ситуационной сетевой структуре МСКМ в зависимости от выбранной стратегии; в-пятых, выбор наилучшей последовательности ситуативных решений в ситуационной сетевой структуре МСКМ для выбранной стратегии; в-шестых, сценарное моделирование и оптимизацию применения управляющих решений из выбранной наилучшей их последовательности на основе использования когнитивной сетевой структуры МСКМ.

На рис. 5 представлена схема проведения экспериментальных исследований для сравнительной оценки качества управления и эффективности функционирования ТВУ.

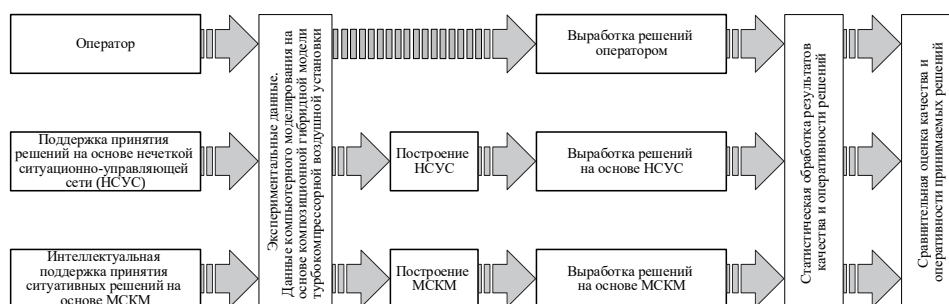


Рис. 5. Схема экспериментальных исследований для сравнительной оценки качества управления и эффективности функционирования ТВУ

В табл. 2 представлены нечеткие значения весов переходов между ситуациями фактической ситуационной сетевой структуры МСКМ, взвешенные в зависимости от различных стратегий управления ТВУ: К – «качественная стратегия» – минимизация числа переходов из текущей в целевую ситуацию; Э – «экономичная стратегия» – минимизация затратности ресурсов при переходе из текущей в целевую ситуацию; Б – «безопасная стратегия» – минимизация рисков негативных последствий при переходе из текущей в целевую ситуацию; С – «сбалансированная стратегия» – максимизация среднего веса ситуационных переходов; Б-К – «безопасная-качественная стратегия» – смешанная стратегия; Б-Э – «безопасная-экономичная стратегия» – смешанная стратегия.

Таблица 2

Исходная ситуация	Результатирующая ситуация	Управляющее решение	Нечеткие значения весов переходов между ситуациями в зависимости от стратегии управления					
			$\tilde{W}_{Sf_{beg}, Sf_{end}}^{(K)}$	$\tilde{W}_{Sf_{beg}, Sf_{end}}^{(Э)}$	$\tilde{W}_{Sf_{beg}, Sf_{end}}^{(Б)}$	$\tilde{W}_{Sf_{beg}, Sf_{end}}^{(C)}$	$\tilde{W}_{Sf_{beg}, Sf_{end}}^{(Б-К)}$	$\tilde{W}_{Sf_{beg}, Sf_{end}}^{(Б-Э)}$
Sf_1	Sf_2	G_{Sf_1, Sf_2}^*	0,5	0,6	0,9	0,8	0,7	0,75
Sf_1	Sf_3	G_{Sf_1, Sf_3}^*	0,7	0,85	0,7	0,6	0,7	0,78
Sf_2	Sf_{349}	$G_{Sf_1, Sf_{349}}^*$	0,9	0,9	0,4	0,5	0,65	0,65
Sf_3	Sf_{348}	$G_{Sf_3, Sf_{348}}^*$	0,8	0,8	0,5	0,9	0,65	0,65

Sf_{348}	Sf_{349}	$G_{Sf_{348}, Sf_{349}}^*$	0,5	0,6	0,9	0,7	0,7	0,75
Sf_{348}	Sf_{350}	$G_{Sf_{348}, Sf_{350}}^*$	0,7	0,75	0,7	0,5	0,7	0,73
Sf_{349}	Sf_{350}	$G_{Sf_{349}, Sf_{350}}^*$	0,5	0,6	0,9	0,8	0,7	0,75
...	...	...	...	...	...	...	...	...
Sf_2	Sf_1	G_{Sf_2, Sf_1}^*	0,6	0,6	0,9	0,8	0,75	0,75
Sf_3	Sf_1	G_{Sf_3, Sf_1}^*	0,7	0,8	0,7	0,6	0,7	0,78
Sf_{348}	Sf_3	G_{Sf_{348}, Sf_3}^*	0,8	0,75	0,6	0,9	0,6	0,68
Sf_{349}	Sf_2	G_{Sf_{349}, Sf_2}^*	0,9	0,8	0,5	0,5	0,7	0,65
Sf_{350}	Sf_{348}	$G_{Sf_{350}, Sf_{348}}^*$	0,7	0,7	0,8	0,5	0,75	0,75
Sf_{350}	Sf_{349}	$G_{Sf_{350}, Sf_{349}}^*$	0,5	0,6	0,9	0,8	0,7	0,75

В табл. 3 показаны результаты оценки повышения качества управления ТВУ с использованием построенной МСКМ, по сравнению, во-первых, с оператором ТВУ, во-вторых, с нечеткой ситуационно-управляющей сетью (НСУС) ([11]), полученные в ходе экспериментальных исследований.

Таблица 3

Повышение качества управления на основе МСКМ по сравнению:	Стратегия управления					
	К	Э	Б	С	Б–К	Б–Э
с оператором (стаж не менее 5 лет) (%)	12,3	15,9	12,1	14,4	–	–
с НСУС (%)	4,8	4,1	5,3	6,8	4,4	4,0

В качестве показателей эффективности функционирования ТВУ использовались: во-первых, КПД, во-вторых, коэффициент напора.

В табл. 4 представлены результаты сравнительной оценки эффективности функционирования ТВУ при ее управлении, во-первых, оператором ТВУ, во-вторых, с использованием НСУС, и, в-третьих, с использованием предлагаемой МСКМ. При этом погрешность результатов сравнительной оценки для КПД составила 3,21%, а для коэффициента напора – 2,51%.

Таблица 4

Метод управления	Показатель качества	Стратегия управления					
		К	Э	Б	С	Б–К	Б–Э
Оператор (стаж не менее 5 лет)	КПД	0,75	0,76	0,75	–	–	–
	Коэффициент напора	0,45	0,46	0,45	–	–	–
На основе НСУС	КПД	0,78	0,76	0,74	0,76	0,76	0,77
	Коэффициент напора	0,51	0,49	0,47	0,5	0,49	0,45
На основе МСКМ	КПД	0,78	0,78	0,74	0,78	0,77	0,77
	Коэффициент напора	0,51	0,5	0,48	0,51	0,5	0,47

Полученные результаты сравнительной оценки позволяют обосновать повышение качества интеллектуального управления и эффективности функционирования ТВУ в условиях неопределенности с использованием МСКМ для всех стратегий управления и сценариев достижения целевых ситуаций.

Заключение. В данной статье разработана МСКМ, предназначенная для интеллектуального управления ТВУ, для которой предъявляются повышенные требования к качеству управления, энерго- и ресурсозатратности, безопасности эксплуатации.

Разработаны программные средства для построения, настройки и применения МСКМ, с использованием которых проведено компьютерное моделирование и выполнена сравнительная оценка качества управления и эффективности функционирования ТВУ. Для компьютерного моделирования ТВУ использована ранее разработанная и обученная композитная гибридная модель ТВУ, включающая в себя взаимодействующие компонентные модели различных типов (аналитические модели с четкими и нечеткими параметрами, нечетко-логические модели, нейросетевые модели).

Проведены экспериментальные исследования интеллектуального управления и эффективности функционирования ТВУ с использованием МСКМ, которые включали в себя: идентификацию текущей ситуации ТВУ в соответствии с построенной фактической ситуационной сетевой структурой МСКМ; задание целевой ситуации из фактической ситуационной сетевой структуры МСКМ; выбор стратегии управления для достижения целевых ситуаций в ситуационной сетевой структуре МСКМ; формирование последовательностей управляющих решений в ситуационной сетевой структуре МСКМ в зависимости от выбранной стратегии; выбор наилучшей последовательности ситуативных решений в ситуационной сетевой структуре МСКМ для выбранной стратегии; сценарное моделирование и оптимизацию применения управляющих решений из выбранной наилучшей их последовательности на основе использования когнитивной сетевой структуры МСКМ.

Получены результаты оценки качества управления ТВУ и эффективности функционирования ТВУ с использованием построенной МСКМ, по сравнению, во-первых, с оператором ТВУ, во-вторых, с нечеткой ситуационно-управляющей сетью. Полученные результаты позволяют обосновать повышение качества интеллектуального управления и эффективности функционирования ТВУ в условиях неопределенности с использованием МСКМ для всех стратегий управления и сценариев достижения целевых ситуаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борисов В.В. Систематизация нечетких и гибридных нечетких моделей // Мягкие измерения и вычисления. – 2020. – Т. 29, № 4. – С. 98-120.
2. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы / под ред. В.М. Курейчика. – 3-е изд. – М.: Физматлит, 2025. – 368 с.
3. Gladkov L.A., Veselov G.E., Gladkova N.V. Development and research of algorithms for the synthesis of combinational logic circuits based on the evolutionary approach // Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 776 "Proceedings of the 7th International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (ITI'23)". Vol. 1. – Springer Nature Switzerland AG 2023. – P. 210-221.
4. Курейчик В.В., Родзин С.И. Вычислительные модели биоэвристик, основанных на физических и когнитивных процессах (обзор) // Информационные технологии. – 2021. – Т. 27, № 11. – С. 563-574.
5. Булыгина О.В., Ярцев Д.Д., Прокимов Н.Н., Верейкина Е.К. Направления гибридизации алгоритмов роевого интеллекта и нечеткой логики для решения оптимизационных задач в социально-экономических системах // Прикладная информатика. – 2024. – Т. 19, № 5. – С. 65-87.
6. Курейчик В.В., Родзин С.И. Вычислительные модели эволюционных и роевых биоэвристик (обзор) // Информационные технологии. – 2021. – Т. 27, № 10. – С. 507-520.
7. Алтунин А.Е. Теоретическое и практическое применение методов принятия решений в условиях неопределенности. В 3-х т. Т. 1. – [б. м.]: Издательские решения, 2019. – 484 с.
8. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. – М.: Наука, 1990. – 272 с.
9. Федунцов Б.Е. Механизмы вывода в базе знаний бортовых оперативно советующих экспертных систем // Известия РАН. ТиСУ. – 2002. – № 4. – С. 42-52.
10. Борисов В.В., Зернов М.М. Реализация ситуационного подхода на основе иерархической ситуационно-событийной сети // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2009. – № 1. – С. 17-30.
11. Борисов В.В., Авраменко Д.Ю. Нечеткое ситуационное управление сложными системами на основе их композиционного гибридного моделирования // Системы управления, связи и безопасности. – 2021. – № 3. – С. 207-237.
12. Sokolov A.M., Budzko V.I., Zatsarinnyy A.A. Fuzzy situational precedent analysis and modeling of processes in complex technical systems // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2024. – Vol. 34, No. 3. – P. 673-678.
13. Соколов А.М., Борисов В.В. Рекуррентные нечеткие ситуационно-прецедентные модели для оперативного управления сложными техническими объектами по прецедентам // Программные продукты и системы. – 2024. – № 4. – С. 42-51.
14. Борисов В.В., Соколов А.М. Ситуационно-прецедентное управление сложными системами. – Смоленск: Универсум, 2024. – 130 с.
15. Дли М.И., Черновалова М.В., Соколов А.М. Построение нечетких ситуационно-прецедентных моделей региональных экономических систем с использованием онтологий // Прикладная информатика. – 2025. – Т. 20, № 2. – С. 112-125.

16. Борисов В.В., Федулов А.С., Федулова С.А. Поддержка принятия ситуативных решений на основе сочетания нечеткого ситуационного и когнитивного подходов // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2025. – № 4. – С. 95-111.
17. Никифоров А.Г., Попова Д.Ю., Солдатова К.В., Соловьева О.А. Опыт обобщения результатов расчетного исследования безлопаточных диффузоров центробежных компрессорных ступеней с помощью нейронно-сетевой модели // Компрессорная техника и пневматика. – 2015. – № 4. – С. 14-17.
18. Никифоров А.Г., Попова Д.Ю., Солдатова К.В. Нейросетевые модели политропного КПД и коэффициента напора промежуточной ступени центробежного компрессора // Компрессорная техника и пневматика. – 2015. – № 6. – С. 30-33.
19. Федулова С.А. Программные средства интеллектуальной поддержки принятия решений на основе нечеткого ситуационно-когнитивного подхода // Тр. XXVII Международной научной конференции «Системы компьютерной математики и их приложения» (СКМП-2026, Смоленск, 22-23 мая 2026 г.). – Вып. 27. – Т. 1. – С. 84-86. – Смоленск: Изд-во СмолГУ, 2026. – 319 с.
20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025691523 от 14.11.2025. Программа анализа и моделирования сложных процессов на основе нечеткого ситуационно-когнитивного подхода / Борисов В.В., Жарков А.П., Федулова С.А., Черновалова М.В.

REFERENCES

1. Borisov V.V. Sistematizatsiya nechetkikh i gibridnykh nechetkikh modeley [Systematization of fuzzy and hybrid fuzzy models], *Myagkie izmereniya i vychisleniya* [Soft Measurements and Computations], 2020, Vol. 29, No. 4, pp. 98-120.
2. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M. Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms], ed. by V.M. Kureychika. 3rd ed. Moscow: Fizmatlit, 2025, 368 p.
3. Gladkov L.A., Veselov G.E., Gladkova N.V. Development and research of algorithms for the synthesis of combinational logic circuits based on the evolutionary approach, *Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 776 "Proceedings of the 7th International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (ITI'23)". Vol. 1.* Springer Nature Switzerland AG 2023, pp. 210-221.
4. Kureychik V.V., Rodzin S.I. Vychislitel'nye modeli bioevristik, osnovannykh na fizicheskikh i kognitivnykh protsessakh (obzor) [Computational models of bioheuristics based on physical and cognitive processes (review)], *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies], 2021, Vol. 27, No. 11, pp. 563-574.
5. Bulygina O.V., Yartsev D.D., Prokimmov N.N., Vereykina E.K. Napravleniya gibridizatsii algoritmov roevogo intellekta i nechetkoy logiki dlya resheniya optimizatsionnykh zadach v sotsial'no-ekonomicheskikh sistemakh [Directions of hybridization of swarm intelligence algorithms and fuzzy logic for solving optimization problems in socio-economic systems], *Prikladnaya informatika* [Applied Informatics], 2024, Vol. 19, No. 5, pp. 65-87.
6. Kureychik V.V., Rodzin S.I. Vychislitel'nye modeli evolyutsionnykh i roevykh bioevristik (obzor) [Computational models of evolutionary and swarm bioheuristics (review)], *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies], 2021, Vol. 27, No. 10, pp. 507-520.
7. Altunin A.E. Teoreticheskoe i prakticheskoe primeneniye metodov prinyatiya resheniy v usloviyakh neopredelennosti [Theoretical and practical application of decision-making methods under uncertainty]. In 3 vol. Vol. 1. [b. m.]: Izdatel'skie resheniya, 2019, 484 p.
8. Melikhov A.N., Bershteyn L.S., Korovin S.Ya. Situatsionnye sovetuyushchie sistemy s nechetkoy logikoy [Situational advisory systems with fuzzy logic]. Moscow: Nauka, 1990, 272 p.
9. Fedunov B.E. Mekhanizmy vyvoda v baze znaniy bortovykh operativno sovetuyushchikh ekspertnykh sistem [Inference mechanisms in the knowledge base of on-board operational advisory expert systems], *Izvestiya RAN. TISU* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Control Theory and Systems], 2002, No. 4, pp. 42-52.
10. Borisov V.V., Zernov M.M. Realizatsiya situatsionnogo podkhoda na osnove ierarkhicheskoy situatsionno-sobytiynoy seti [Implementation of a situational approach based on a hierarchical situational-event network], *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial Intelligence and Decision Making], 2009, No. 1, pp. 17-30.
11. Borisov V.V., Avramenko D.Yu. Nchetkoe situatsionnoe upravleniye slozhnyimi sistemami na osnove ikh kompozitsionnogo gibridnogo modelirovaniya [Fuzzy situational control of complex systems based on their compositional hybrid modeling], *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Control, Communications and Security Systems], 2021, No. 3, pp. 207-237.
12. Sokolov A.M., Budzko V.I., Zatsarinnyy A.A. Fuzzy situational precedent analysis and modeling of processes in complex technical systems, *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2024, Vol. 34, No. 3, pp. 673-678.

13. Sokolov A.M., Borisov V.V. Rekurrentnye nechetkie situatsionno-pretседentnye modeli dlya operativnogo upravleniya slozhnymi tekhnicheskimi ob"ektami po pretседentam [Recurrent fuzzy situational-precedent models for operational control of complex technical objects based on precedents], *Programmnye produkty i sistemy* [Software Products and Systems], 2024, No. 4, pp. 42-51.
14. Borisov V.V., Sokolov A.M. Situatsionno-pretседentnoe upravlenie slozhnymi sistemami [Situational-precedent control of complex systems]. Smolensk: Universum, 2024, 130 p.
15. Dli M.I., Chernovalova M.V., Sokolov A.M. Postroenie nechetskikh situatsionno-pretседentnykh modeley regional'nykh ekonomicheskikh sistem s ispol'zovaniem ontologii [onstruction of fuzzy situational-precedent models of regional economic systems using ontologies], *Prikladnaya informatika* [Applied Informatics], 2025, Vol. 20, No. 2, pp. 112-125.
16. Borisov V.V., Fedulov A.S., Fedulova S.A. Podderzhka prinyatiya situativnykh resheniy na osnove sochetaniya nechetkogo situatsionnogo i kognitivnogo podkhodov [Support for making situational decisions based on a combination of fuzzy situational and cognitive approaches], *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial Intelligence and Decision Making], 2025, No. 4, pp. 95-111.
17. Nikiforov A.G., Popova D.Yu., Soldatova K.V., Solov'eva O.A. Opyt obobshcheniya rezul'tatov raschetnogo issledovaniya bezlopatochnykh diffuzorov tsentrobezhnykh kompressornykh stupeney s pomoshch'yu neyronno-setevoy modeli [Experience of generalizing the results of a computational study of vaneless diffusers of centrifugal compressor stages using a neural network model], *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika* [Compressor Technology and Pneumatics], 2015, No. 4, pp. 14-17.
18. Nikiforov A.G., Popova D.Yu., Soldatova K.V. Neyrosetevye modeli politropnogo KPD i koeffitsienta napora promezhutochnoy stupeni tsentrobezhnogo kompressora [Neural network models of polytropic efficiency and pressure coefficient of the intermediate stage of a centrifugal compressor], *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika* [Compressor Technology and Pneumatics], 2015, No. 6, pp. 30-33.
19. Fedulova S.A. Programmnye sredstva intellektual'noy podderzhki prinyatiya resheniy na osnove nechetkogo situatsionno-kognitivnogo podkhoda [Software for intelligent decision support based on a fuzzy situational-cognitive approach], *Tr. XXVII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Sistemy komp'yuternoy matematiki i ikh prilozheniya» (SKMP-2026, Smolensk, 22-23 maya 2026 g.)* [Proceedings of the XXVII International Scientific Conference "Systems of Computer Mathematics and their Applications" (SKMP-2026, Smolensk, May 22-23, 2026)], Issue 27, Vol. 1, pp. 84-86. Smolensk: Izd-vo SmolGU, 2026, 319 p.
20. Borisov V.V., Zharkov A.P., Fedulova S.A., Chernovalova M.V. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2025691523 ot 14.11.2025. Programma analiza i modelirovaniya slozhnykh protsessov na osnove nechetkogo situatsionno-kognitivnogo podkhoda [Certificate of state registration of computer program No. 2025691523 dated November 14, 2025. Program for analysis and modeling of complex processes based on a fuzzy situational-cognitive approach].

Федулова Светлана Александровна – Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске; e-mail: svfed67@mail.ru; г. Смоленск, Россия; зав. лабораторией информатизации; старший преподаватель кафедры вычислительной техники.

Fedulova Svetlana Alexandrovna – Smolensk Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute"; e-mail: svfed67@mail.ru; Smolensk, Russia; head of the Informatization Laboratory; Senior lecturer at the Department of Computer Engineering.

УДК 621.317.08

DOI 10.18522/2311-3103-2026-3-254-264

Д.Л. Тукаев, Е.В. Крамарев, О.В. Афанасьева, Д.А. Первухин

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ С РАЗНОТОЧНЫМИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ТРАКТАМИ

Современный этап развития методологии анализа и синтеза сложных технических систем характеризуется существенным повышением требований к скорости их проектирования без потери качества функционирования за счет применения информационных технологий проектирования сложных систем и моделирования процесса их функционирования. В этой парадигме представляется актуальным решение задачи по созданию адаптивных многоагентных систем контроля технического состояния высокоответственных объектов, использующих для измерения каждого типа контролируемого параметра систему разноточных измерительных трактов, ко-