

УДК 004.89

Нечеткое ситуационное управление сложными системами на основе их композиционного гибридного моделирования

Борисов В. В., Авраменко Д. Ю.

Постановка задачи: рассматривается класс сложных технических систем (СТС), характеризующихся: многокомпонентностью, большим числом количественно-качественных параметров, нелинейностью взаимозависимостей между ними; неполнотой информации, сложностью экспериментальных исследований, рисками возникновения опасных ситуаций и катастрофичностью их последствий; уникальностью режимов и условий функционирования систем. Особенности таких систем обуславливают специфику их анализа и моделирования: невозможность создания и использования общих аналитических моделей; сложность обеспечения достоверности моделирования из-за уникальности, недостаточности данных об опасных и аварийных режимах функционирования СТС. Эти особенности позволяют обосновать целесообразность комбинирования различных подходов и методов для построения и композиции единой модели системы из моделей отдельных ее компонентов. В свою очередь, особенности управления такими СТС позволяют обосновать целесообразность применения нечеткого ситуационного подхода, позволяющего учитывать специфику композиционного моделирования и различных стратегий ситуационного управления, в зависимости от складывающихся условий и предъявляемых требований. **Целью работы** является разработка и исследование: во-первых, метода анализа и композиционного гибридного моделирования СТС, ориентированного на их особенности в условиях неполноты информации, разнокачественных данных о состоянии и функционировании СТС; во-вторых, метода нечеткого ситуационного управления сложными системами, обеспечивающего повышение эффективности управления ими в зависимости от стратегии управления и ограничений, а также позволяющего органично объединить процессы композиционного моделирования и нечеткого ситуационного управления. **Используемые методы:** решение задач анализа, композиционного гибридного моделирования, нечеткого ситуационного управления СТС основывается на использовании методов системного анализа, теории искусственных нейронных сетей, нечетких множеств, отношений и нечеткого логического вывода, нечетких ситуационных сетей, математической статистики. **Новизна** заключается в том, что разработан метод анализа и композиционного гибридного моделирования СТС, ориентированный на особенности этих систем и их процессов в условиях неполноты информации, разнокачественных данных об их состоянии и функционировании, отличающийся от известных сочетанием возможностей аналитического, нейросетевого и нечеткого подходов к построению композиционных гибридных моделей СТС, позволяющий осуществлять адаптацию к изменениям системных и внешних факторов, повысить точность моделирования, а также типизировать представление нечетких ситуационных признаков для эффективного управления СТС. Создан метод нечеткого ситуационного управления СТС на основе композиционных гибридных моделей, заключающийся в применении нечеткой ситуационно-управляющей сети для идентификации текущих ситуаций, поиска и выбора последовательностей управляющих решений при переводе системы в целевые ситуации, обеспечивающий повышение эффективности управления в зависимости от стратегии управления и ограничений, а также позволяющий органично объединить процессы композиционного моделирования и нечеткого ситуационного управления. **Результат:** предлагаемые методы использованы для решения задач управления компрессорными установками. **Практическая значимость** полученных результатов заключается в том, что использование разработанных методов в научно-исследовательской практике лаборатории «Моделирование технологических процессов и проектирование энергетического оборудования» ЦНТИ ФГАОУ ВО «СПбПУ» позволило повысить точность моделирования, а также эффективность управления компрессорными установками (в соответствии с критериями безопасности, экономической эффективности, точности регулирования).

Ключевые слова: композиционное гибридное моделирование, сложная система, нечеткая ситуационно-управляющая сеть, нечеткое ситуационное управление.

Библиографическая ссылка на статью:

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. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-3-207-237

Reference for citation:

Borisov V. V., Avramenko D. Yu. Fuzzy situational control of complex systems based on composite hybrid modeling. Systems of Control, Communication and Security, 2021, no. 3, pp. 207-237 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2021-3-207-237

Актуальность

Рассматривается класс сложных технических систем (СТС), особенностями которых являются:

- многокомпонентность и сложность структуры, нелинейная взаимозависимость между ними количественно и качественно задаваемыми параметрами;
- неполнота исходных данных, сложность и затратность проведения экспериментов, риски возникновения опасных ситуаций и их негативные последствия;
- уникальность СТС, и, как следствие, сложность транслирования накопленного опыта на аналогичные СТС;
- разнообразие воздействий внутренних и внешних факторов на СТС, их стохастический и нестохастический характер;
- изменение структуры и параметров в ходе функционирования СТС;
- использование таких СТС для обеспечения непрерывности функционирования более масштабных систем.

К системам данного класса относятся, например, центробежные компрессоры – высокооборотные лопастные энергетические машины, основанные на преобразовании механической энергии в кинетическую, а также насосы, вентиляторы и обратные к ним машины – турбины. При этом, несмотря на кажущуюся вспомогательную роль лопастных энергетических машин, они являются неотъемлемой частью большинства промышленных комплексов и применяются во многих отраслях народного хозяйства: химической, нефтегазовой, машиностроительной, транспортной, металлургической, геологической, в сфере строительства, агропромышленном комплексе, а также в перспективных направлениях техники и технологий – в космонавтике, робототехнике, производстве искусственного топлива и других.

Указанные выше свойства таких СТС обуславливают специфику подходов к их анализу и моделированию:

- отсутствие единого подхода для создания и использования общих аналитических моделей СТС, учитывающих особенности всех компонентов и процессов моделируемых СТС;
- недостаточность данных и невозможность непосредственного анализа опасных и аварийных режимов и условий функционирования СТС;
- закрытость, конфиденциальность и сложность получения сведений об СТС от разных разработчиков.

Свойства этих СТС и особенности их моделирования позволяют обосновать целесообразность комбинирования различных подходов и методов для построения композиционной модели СТС из моделей отдельных ее компонентов.

Известны различные подходы к анализу и моделированию СТС и процессов таких специалистов как А.Е. Алтунин, Е.В. Бодянский, Н.П. Бусленко, А.Н. Горбань, А.А. Самарский, В.М. Курейчик, А.Е. Мисник, В.П. Тарасик, S. Haykin, К.М. Hangos, F. Rosenblatt и других [1-5]. Однако в этих исследованиях, как правило, осуществляется композиция однотипных компонентных моделей, не предлагаются способы обоснования и гибридизации моделей различных

типов, а также создания композиционных гибридных моделей СТС в целом, учитывающих как специфику разработки, обучения и взаимодействия разнотипных компонентных моделей, так и трансляцию сведений об опасных и аварийных ситуациях для их адаптивной структурно-параметрической настройки.

Особенностями управления такими СТС являются следующие:

- управление выполняется по параметрам (например, по числу оборотов приводящего двигателя, байпасированием, дросселированием и др.) с учетом условий безопасности, без оптимизации эффективности;
- представляет собой выработку и реализацию различных последовательностей управляющих решений по переходу в целевую ситуацию в зависимости от стратегии управления;
- неполнота и неопределенность данных о СТС, сложность формализации критериев эффективности управления СТС затрудняет реализацию соответствующих стратегий управления и достижение цели управления;
- выполнение дополнительных требований при переходе через промежуточные ситуации (например, для обеспечения безопасности);
- ошибки управления могут привести к выходу из строя СТС, к аварийным ситуациям и к негативным последствиям;
- необходимость адаптации управления к изменению структуры и параметров в процессе функционирования СТС, системных и внешних факторов;
- инерционный характер функционирования СТС, снижающий требования к оперативности управляющих воздействий;
- задачи и процессы моделирования и управления СТС, как правило, обособлены друг от друга.

Вышесказанное позволяет обосновать целесообразность применения для управления СТС нечеткого ситуационного подхода с учетом специфики композиционного моделирования. Теоретические основы ситуативного представления и управления описаны в работах Д.А. Поспелова, Б.Е. Федунова, F. Lin, J. McCarthy [6-9]. Нечеткие ситуационные сети, позволяющие существенно снизить число управляемых ситуаций, описаны в работах таких исследователей как Л.С. Берштейн, В.В. Борисов, М.А. Денисенков, М.М. Зернов, С.Я. Коровин, А.Н. Мелихов, А.С. Ющенко и других [10-14]. Однако в этих работах не рассмотрены вопросы нечеткого ситуативного управления СТС на основе их композиционных гибридных моделей и возможности интеграции процессов композиционного моделирования и нечеткого ситуационного управления СТС.

В статье рассматривается метод анализа и композиционного гибридного моделирования СТС, ориентированный на особенности этих систем и их процессов в условиях неполноты информации, разнокачественных данных о состоянии и функционировании СТС, отличающийся сочетанием возможностей аналитического, нейросетевого и нечеткого подходов к построению композиционных гибридных моделей СТС, позволяющий осуществлять адаптацию к изменениям системных и внешних факторов, повысить точность моделирования, а

также типизировать представление нечетких ситуационных признаков для эффективного управления СТС.

Также описывается предложенный метод нечеткого ситуационного управления СТС на основе композиционных гибридных моделей, заключающийся в применении предварительно построенной нечеткой ситуационно-управляющей сети для идентификации текущих ситуаций, поиска и выбора последовательностей управляющих решений при переводе СТС в целевые ситуации. Метод обеспечивает повышение эффективности управления СТС в зависимости от стратегии управления и ограничений, а также позволяет объединить процессы композиционного моделирования и нечеткого ситуационного управления.

Постановка задачи

В основе постановки задачи лежит формализованное представление двух взаимосвязанных задач: *во-первых*, композиционного гибридного моделирования СТС; *во-вторых*, нечеткого ситуационного управления СТС.

Постановка задачи композиционного гибридного моделирования СТС заключается в следующем.

Пусть выполняется декомпозиция СТС на совокупность компонентов:

$$Sys = \{Comp_1, \dots, Comp_N\},$$

где $Comp_n$ – n -й компонент СТС, $n = 1, \dots, N$.

Определено множество признаков компонентов СТС и их значения:

$$R = \{R_1, \dots, R_I\}, \quad R_i = \{R_{i,1}, \dots, R_{i,m_i}\},$$

где R_i – i -й признак компонентов СТС; $\{R_{i,1}, \dots, R_{i,m_i}\}$ – значения R_i .

Каждому компоненту СТС может быть сопоставлена одна или группа требований (значений признаков):

$$\forall Comp_n \in Sys: G_n = \{G_{n,1}, \dots, G_{n,K_n}\},$$

$$G_{n,k_n} = \{R_{i,m_i} \mid i = 1, \dots, I, R_{i,m_i} \in R_i\}, k_n = 1, \dots, K_n,$$

где G_n – множество групп требований со стороны n -й компонента СТС; G_{n,k_n} – группа требований со стороны n -го компонента СТС.

Требуется разработать метод анализа и композиционного гибридного моделирования СТС, позволяющий:

- определить типы компонентных моделей для анализа и моделирования компонентов СТС:

$$MComp = \{MComp_1, \dots, MComp_P\},$$

где $MComp_p$ – p -й тип компонентных моделей, $p = 1, \dots, P$;

- выбрать совокупность компонентных моделей для построения композиционной гибридной модели СТС по результатам сопоставления групп требований к компонентным моделям со стороны компонентов СТС

$$\forall Comp_n \in Sys: Mcomp_l^p \in Mcomp_p,$$

где $Mcomp_l^p$ – l -я компонентная модель p -го типа, свойства которой удовлетворяют требованиям со стороны n -го компонента СТС;

- осуществлять мониторинг состояния СТС, структурно-параметрическую настройку и изменение типов компонентных моделей таким образом, чтобы обеспечить требуемую точность моделирования как для отдельного компонента СТС:

$$Val(Mcomp_i^p) \leq Val_{c-req},$$

так и для СТС в целом

$$Val(\{Mcomp_i^p\}) \leq Val_{sys-req}.$$

Постановка задачи нечеткого ситуативного управления СТС заключается в следующем.

Пусть имеется:

- $P = \{p_i \mid i = 1, \dots, I\}$ – множество нечетких ситуативных признаков (оцениваемых на основе результатов композиционного гибридного моделирования СТС), которыми описываются состояния СТС $S = \{s_j \mid j = 1, \dots, J\}$;
- $R = \{r_{k_i}^{(p_i)} \mid k_i = 1, \dots, K_i, i = 1, \dots, I\}$ – множество нечетких управляющих решений;
- $U = \{u_{j_k, j_l} \mid s_{j_k}, s_{j_l} \in S\}$ – множество управляющих переходов между нечеткими ситуациями;
- $D = \{D_{s_{cur}, s_{tar}}\}$ – множество маршрутов, включающее в себя подмножество $D_{s_{cur}, s_{tar}} = \{d_b^{(s_{cur}, s_{tar})} \mid b = 1, \dots, B_{s_{cur}, s_{tar}}\}$, $s_{cur}, s_{tar} \in S$ маршрутов между различными текущими (идентифицированными) s_{cur} и целевыми s_{tar} нечеткими ситуациями.

Требуется разработать метод нечеткого ситуативного управления СТС на основе композиционных гибридных моделей, позволяющий осуществить:

- построение нечеткой ситуативной сети, включающее в себя задание нечетких ситуационных признаков, нечетких ситуаций, управляющих решений, управляющих переходов, формирование структуры сети;
- идентификацию текущей нечеткой ситуации СТС;
- определение целевой ситуации, задание стратегии, поиск маршрутов (последовательностей управляющих решений) для достижения целевой ситуации в зависимости от заданной стратегии:

$$\forall s_{cur}, s_{tar} \in S, s_{cur} \xrightarrow{D_{s_{cur}, s_{tar}} \subset D} s_{tar} : D_{s_{cur}, s_{tar}} = \{d_b^{(s_{cur}, s_{tar})} \mid b = 1, \dots, B_{s_{cur}, s_{tar}}\},$$

где $B_{s_{cur}, s_{tar}}$ – число маршрутов между ситуациями s_{cur} и s_{tar} ;

- адаптацию нечеткой ситуационной сети к изменениям композиционной гибридной модели СТС.

Метод анализа и композиционного гибридного моделирования СТС

Реализуемый подход к моделированию СТС рассматриваемого класса основан на декомпозиции СТС, обоснованном выборе типов и разновидностей

компонентных моделей, их объединении в композиционную модель СТС с настройкой и адаптацией в процессе функционирования и управления.

С учетом указанных ранее особенностей СТС предлагается описанный *метод анализа и композиционного гибридного моделирования СТС*.

Этап 1. Сбор и обобщение информации о СТС (о свойствах и характеристиках СТС; структуре СТС; компонентах СТС; состояниях СТС; взаимосвязях между компонентами СТС; инертности СТС; внешних факторах, влияющих на функционирование СТС).

Этап 2. Выделение компонентов СТС и выявление значимых показателей.

Шаг 1. Выявление и группирование показателей выделенных компонентов СТС. Показатели компонентов СТС могут быть следующих типов: показатели, характеризующие структуру и свойства компонентов СТС; показатели процессов, значения которых преобразуются и «транслируются» от одного компонента СТС к другому; показатели, характеризующие внешнюю среду компонентов СТС.

Шаг 2. Оценка значимости показателей компонентов СТС. Для оценки значимости показателей, влияющих на функционирование компонентов СТС, можно воспользоваться как результатами собранной информации о СТС, так и методами, использующими экспериментальные данные. На рис. 1 показана компонентная схема турбокомпрессорной воздушной установки.

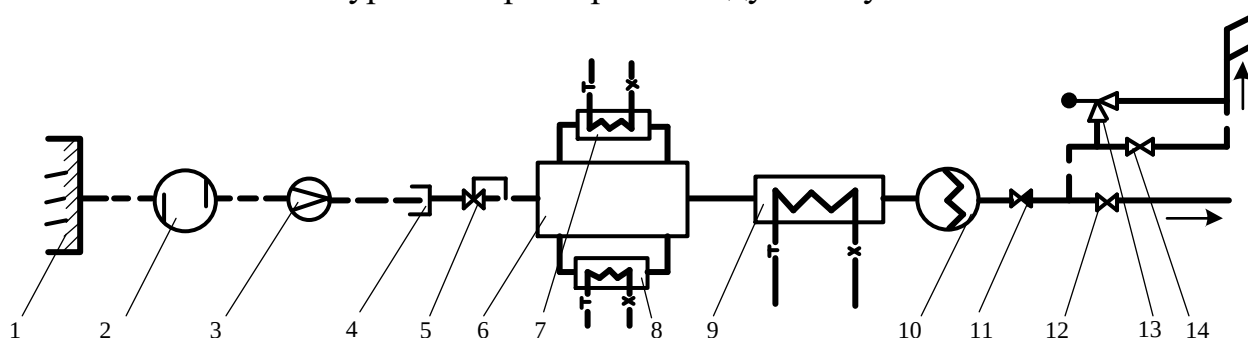


Рис. 1. Компонентная схема турбокомпрессорной воздушной установки.

1 – приемник свободного воздуха, 2 – фильтр, 3 – мерная диафрагма, 4 – компенсатор, 5 – дроссель с регулятором, 6 – турбокомпрессор, 7 и 8 – промежуточные охладители воздуха после первой и второй группы колес, 9 – конечный охладитель, 10 – водоотделитель, 11 – обратный и антипомпажный клапан, 12 – главная задвижка, 13 – предохранительный клапан, 14 – выхлопная задвижка

Этап 3. Создание логической и параметрической моделей СТС.

Шаг 1. Построение потокового параметрического графа СТС, предназначенного для демонстрации взаимодействия компонентов при функционировании системы. Его использование позволяет оперативно на основе изменения параметров и/или геометрических соотношений проанализировать и сопоставить различные конструктивные схемы СТС, и, в конечном итоге, избежать принципиальных ошибок при построении композиционной модели СТС.

На рис. 2 показан пример теплового потокового графа турбокомпрессорной воздушной установки).

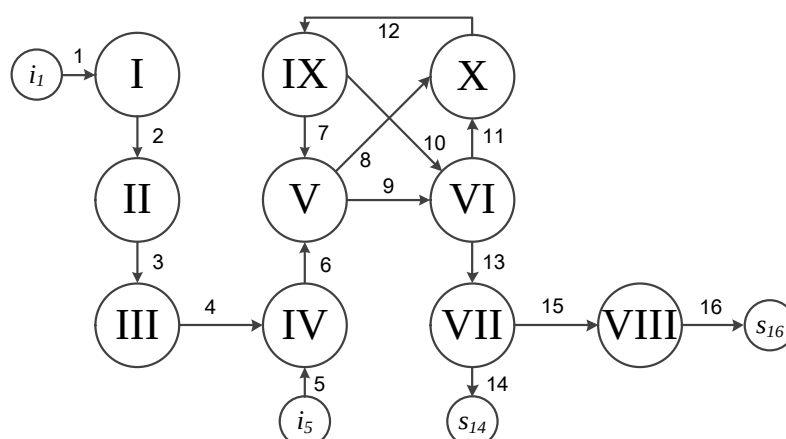


Рис. 2. Пример потокового параметрического графа СТС:

I – приемник свободного воздуха; II – фильтр; III – диафрагма мерная; IV – центробежный компрессор; V – промежуточные охладители воздуха; VI – конечный охладитель воздуха; VII – водоотделитель; VIII – обратный и антипомпажный клапан, IX – насос охлаждающей воды, X – охладитель воды. i_1 – атмосферный воздух, i_5 – электрическая энергия для привода компрессора, s_{14} – конденсат, отводимый из сжатого воздуха (газа), s_{16} – сухой сжатый воздух (газ) к потребителю, где i – источник энергоносителя, s – сток

Шаги 2-4. Построение матриц инцидентий, видов связи и смежности для СТС. Для рассматриваемого примера турбокомпрессорной воздушной установки и его потокового параметрического графа матрица инцидентий представлена в таблице 1, матрица видов связи СТС (для определения наличия энергоносителей для каждого компонента СТС) – в таблице 2, а матрица смежности СТС (для определения контуров СТС) – в таблице 3.

Таблица 1– Пример матрицы инцидентий СТС

Дуги	Компоненты СТС									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	1	0	0	0	-1	0
8	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	1
9	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0
11	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	1
12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1
13	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0

Дуги	Компоненты СТС									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
14	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0

Таблица 1 – Матрица видов связи СТС

Ветви	Энергоноситель						
	1 ^э	2 ^э	3 ^э	4 ^э	5 ^э	6 ^э	7 ^э
1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	1	0	0	0	0
6	0	1	0	0	0	0	0
7	0	0	0	1	0	0	0
8	0	0	0	0	1	0	0
9	0	1	0	0	0	0	0
10	0	0	0	1	0	0	0
11	0	0	0	0	1	0	0
12	0	0	0	1	0	0	0
13	0	1	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	1	0
15	0	0	0	0	0	0	1
16	0	0	0	0	0	0	1

Таблица 2 – Матрица смежности СТС

Узлы	Узлы									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
I	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
II	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
III	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
IV	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
V	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1
VI	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1
VII	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
VIII	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
IX	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1
X	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0

Этап 4. Обоснование и выбор компонентных моделей для построения композиционной гибридной модели СТС.

Шаг 1. Обоснование типов и оценка возможностей компонентных моделей для анализа и моделирования компонентов СТС. В таблице 4 представлены типы компонентных моделей, а также соответствующие им значения признаков компонентов СТС.

Шаг 2. Определение требований к компонентным моделям для анализа и моделирования компонентов СТС. Каждому из компонентов $Comp_i$ ($i=1, \dots, n$)

СТС может быть сопоставлена одна или несколько групп требований к компонентным моделям:

$$Comp_i, \quad i = 1, \dots, n: \{G_{i,1}, G_{i,2}, \dots, G_{i,m_i}\},$$

где m_i – число возможных групп требований к компонентным моделям для представления $Comp_i$.

Таблица 4 – Варианты реализации наборов значений признаков компонентов СТС

Тип компонентной модели	Признаки компонентов СТС			
	R_1	R_2	R_3	R_4
Аналитические модели с четкими параметрами	$R_{1,1}$	$R_{2,1}$	$R_{3,1}$	$R_{4,1}$ OR $R_{4,3}$
Аналитические модели с нечеткими параметрами	$R_{1,1}$	$R_{2,3}$ OR $R_{2,4}$	$R_{3,1}$	$R_{4,1}$
	$R_{1,1}$	$R_{2,3}$ OR $R_{2,4}$	$R_{3,1}$	$R_{4,3}$
ИНС прямого распространения	$R_{1,2}$	$R_{2,1}$	$R_{3,2}$	$R_{4,2}$
Нейро-нечеткие сети	$R_{1,2}$	$R_{2,1}$ OR $R_{2,2}$ OR $R_{2,3}$ OR $R_{2,4}$	$R_{3,2}$	$R_{4,2}$
Нечетко-логические модели	$R_{1,3}$	$R_{2,3}$ OR $R_{2,4}$	$R_{3,3}$	$R_{4,1}$
Нечетко-нейросетевые модели	$R_{1,2}$ OR $R_{1,3}$ OR $R_{1,4}$	$R_{2,1}$ OR $R_{2,2}$ OR $R_{2,3}$ OR $R_{2,4}$	$R_{3,2}$ OR $R_{3,3}$ OR $R_{3,4}$	$R_{4,1}$ OR $R_{4,3}$

Примечания:

- 1) R_1 – представление зависимости между входными и выходными показателями: $\{R_{1,1}$ – в аналитическом виде; $R_{1,2}$ – в виде экспериментальных данных; $R_{1,3}$ – в виде экспертных данных; $R_{1,4}$ – смешанный характер};
- 2) R_2 – представление входных, выходных переменных компонента СТС: $\{R_{2,1}$ – четкие входные и четкие выходные переменные; $R_{2,2}$ – четкие входные и нечеткие выходные переменные; $R_{2,3}$ – нечеткие входные и четкие выходные переменные; $R_{2,4}$ – нечеткие входные и нечеткие выходные переменные};
- 3) R_3 – возможность получения дополнительных данных для уточнения зависимости между входными и выходными переменным, в процессе функционирования: $\{R_{3,1}$ – данные в виде уточняемых параметров аналитической зависимости; $R_{3,2}$ – данные в виде обучающей выборки; $R_{3,3}$ – данные в виде экспертных сведений; $R_{3,4}$ – данные как в виде обучающей выборки, так и в виде экспертных сведений; $R_{3,5}$ – получение каких-либо данных невозможно};
- 4) R_4 – возможность интерпретации зависимости между входными и выходными переменными компонента СТС: $\{R_{4,1}$ – интерпретация возможна; $R_{4,2}$ – интерпретация невозможна; $R_{4,3}$ – интерпретация неважна}.

В таблице 5 показан пример сопоставления групп требований к компонентным моделям.

Таблица 5 – Пример сопоставления групп требований к компонентным моделям со стороны компонентов СТС

Компоненты СТС	Группы требований	Требования			
		R_1	R_2	R_3	R_4
$Comp_1$	$G_{1,1}$	$R_{1,2}$	$R_{2,1}$	$R_{3,2}$	$R_{4,2}$
	$G_{1,2}$	$R_{1,2}$	$R_{2,3}$	$R_{3,2}$	$R_{4,1}$ OR $R_{4,2}$
$Comp_2$	$G_{2,1}$	$R_{1,3}$	$R_{2,2}$	$R_{3,2}$	$R_{4,1}$
	$G_{2,2}$	$R_{1,3}$	$R_{2,3}$	$R_{3,3}$	$R_{4,1}$
	$G_{2,3}$	$R_{1,2}$	$R_{2,4}$	$R_{3,2}$	$R_{4,2}$
...	...	...	...	...	...
$Comp_n$	$G_{n,1}$	$R_{1,1}$	$R_{2,1}$	$R_{3,1}$	$R_{4,3}$
	$G_{n,2}$	$R_{1,2}$	$R_{2,1}$ OR $R_{2,4}$	$R_{3,1}$	$R_{4,3}$

Шаг 3. Выбор совокупности компонентных моделей для построения композиционной гибридной модели СТС.

На основании результатов сопоставления групп требований к компонентным моделям со стороны компонентов СТС определяются совокупности компонентных моделей, образующих «дерево покрытия» СТС (рис. 3).

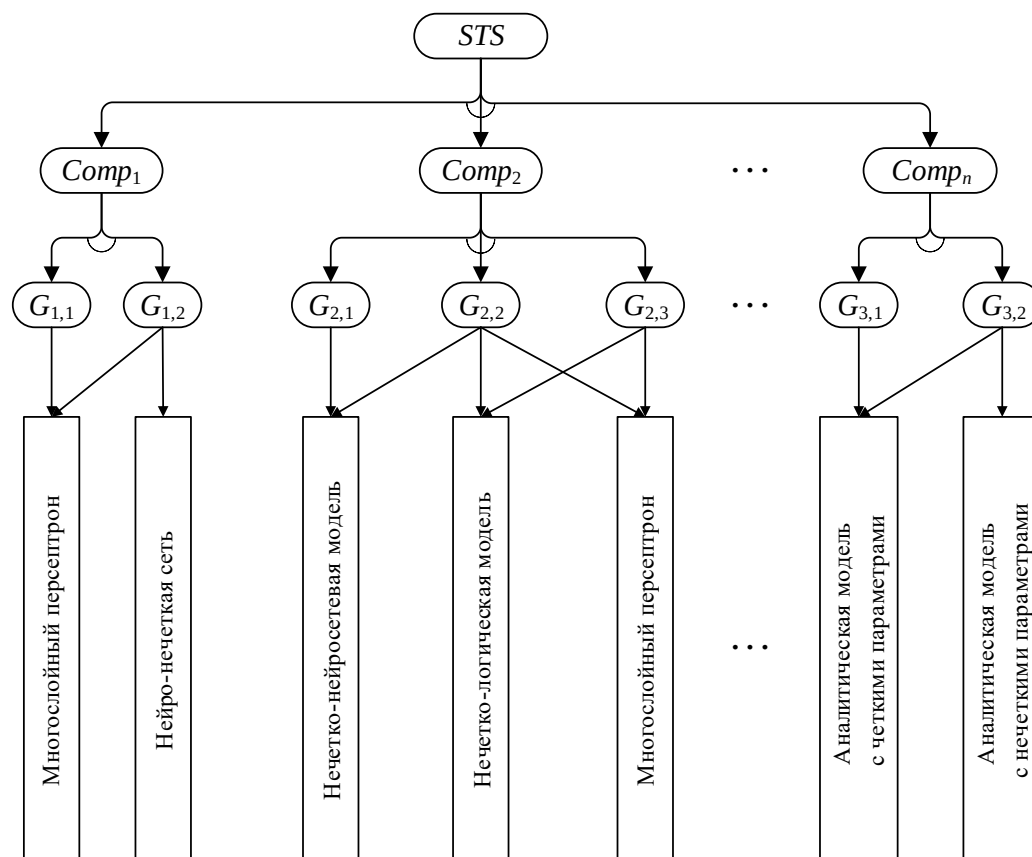


Рис. 3. «Дерево покрытия» СТС компонентными моделями

После определения «дерева покрытия» СТС компонентными моделями осуществляется выбор типа моделей, наиболее рационально позволяющих построить композиционную гибридную модель СТС в целом.

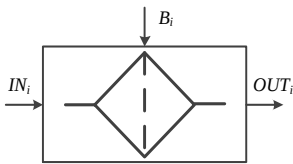
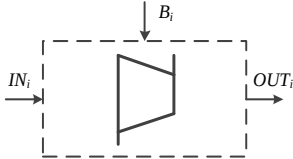
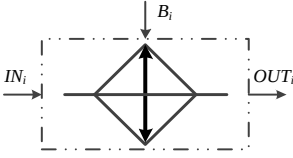
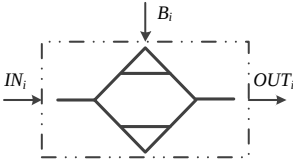
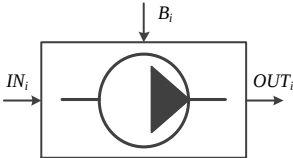
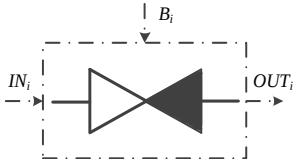
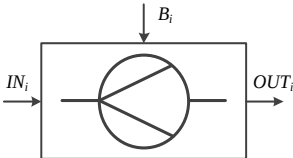
Выбор такого подмножества моделей может быть осуществлен в соответствии с различными критериями рационального выбора, например: *максимизация степени пригодности компонентной модели, максимизация минимальной пригодности, максимизация средней пригодности, минимизация мощности «покрытия»* [15].

Этап 5. Построение компонентных моделей различных типов для описания всех компонентов СТС:

- аналитические компонентные модели СТС с четкими параметрами;
- аналитические компонентные модели СТС с нечеткими параметрами;
- нейросетевые компонентные модели СТС;
- нейро-нечеткие компонентные модели СТС;
- нечетко-логические компонентные модели СТС;
- нечетко-нейросетевые компонентные модели СТС.

Для построения композиционной гибридной модели конкретной СТС формируется библиотека соответствующих компонентных моделей. Например, для создания композиционной гибридной модели турбокомпрессорной воздушной установки реализован набор компонентных моделей, типы и разновидности которых представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Компонентные модели для построения композиционной гибридной модели турбокомпрессорной воздушной установки

Компонент СТС	Обозначение	Тип компонентной модели
Воздуходувка (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

Примечание. Для каждого из указанных выше типов компонентных моделей предложены и/или усовершенствованы методики их построения и структурно-параметрической настройки.

Этап 6. Формирование структуры композиционной гибридной модели СТС на основе объединения построенных компонентных моделей. Структурно-параметрическая настройка взаимосвязей между компонентными моделями в композиционной гибридной модели СТС.

При объединении компонентных моделей в единую композиционную модель СТС, отображающую взаимосвязанные процессы, входы IN_i «последующих» элементов соединяются с выходами OUT_{i-1} «предыдущих». Объединяя компонентные модели в соответствии с их взаимосвязями, а также используя информацию, полученную на предыдущих этапах разработанного метода, создается композиционная гибридная модель СТС. На рис. 4 представлена упрощенная схема для турбокомпрессорной установки с одним компрессором.

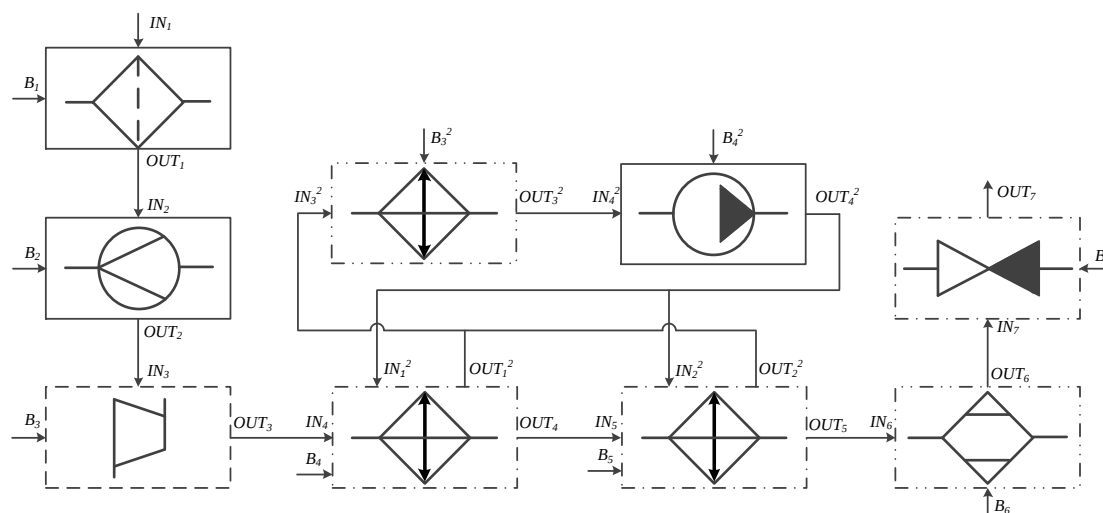


Рис. 4. Структура композиционной гибридной модели турбокомпрессорной установки с одним компрессором

Этап 7. Мониторинг состояния компонентов СТС, структурно-параметрическая настройка и изменение типов компонентных моделей.

Параметры компонентов СТС, их состояние, происходящие в них процессы постоянно изменяются. Если в результате мониторинга выявлено несоответствие между выходными данными компонентных моделей (и композиционной гибридной модели в целом) с данными, полученными с приборов и датчиков СТС, то эти изменения должны учитываться в композиционной модели СТС. В ходе мониторинга состояния компонентов СТС осуществляется:

- оценка точности моделирования компонентов СТС соответствующими компонентными моделями, в зависимости от результатов которой выполняется параметрическая, структурно-параметрическая настройка или замена соответствующих разновидностей моделей, а также переход на компонентные модели других типов, обеспечивающих требуемую точность с учетом накапливаемых данных о функционировании СТС, в том числе, в нештатных, аварийных ситуациях и при изменении внешних факторов;
- оценка накапливаемых данных о компонентах СТС для изменения типов соответствующих компонентных моделей в зависимости от потребности в обеспечении их предпочтительных свойств (например: снижение объема и сложности вычислений; повышение скорости об-

работки и получения результатов моделирования; обеспечение интерпретируемости/«прозрачности» результатов).

В таблице 7 охарактеризованы *ситуации мониторинга состояния компонентов СТС*, механизмы их идентификации, причины и возможные меры по обеспечению заданной точности моделирования.

Таблица 7 – Характеристика ситуаций мониторинга состояния компонентов СТС

Ситуация мониторинга	Характеристика ситуации	Механизм идентификации	Меры по обеспечению заданной точности моделирования
Ситуация 1. Моделирование компонента СТС осуществляется с заданной точностью	Данные соответствуют результатам моделирования; отсутствует необходимость параметрической настройки компонентной модели	Периодическое, обусловленное спецификой компонента СТС, сопоставление результатов функционирования и моделирования	Ситуация не требует принятия каких-либо мер
Ситуация 2. Постепенное ухудшение точности моделирования компонента СТС	Данные постепенно изменяются, и перестают соответствовать заданной точности моделирования с используемой компонентной модели	Периодическое сопоставление результатов функционирования и моделирования; возможна превентивная идентификация этой ситуации на основе прогнозной оценки ухудшения точности моделирования	Выбор (из набора ранее построенных и настроенных моделей) компонентной модели и, при необходимости, ее параметрическая доработка
Ситуация 3. Кратковременное ухудшение точности моделирования компонента СТС	Происходит кратковременное ухудшение и последующее обеспечение заданной точности моделирования	Возможные причины ситуации: нештатная ситуация; сбой оборудования	Информирование о возникшей ситуации. Анализ причин и учет сведений о возникшей ситуации для доработки компонентных моделей
Ситуация 4. Резкое ухудшение точности моделирования компонента СТС	Происходит резкое ухудшение заданной точности моделирования	Возможные причины ситуации: нештатная или аварийная ситуация; сбой или выход из строя оборудования; резкое изменение внешних факторов	Информирование о возникшей ситуации и, при необходимости, остановка СТС. Анализ причин и учет сведений о возникшей ситуации

В таблице 8 представлены примеры сформулированных эмпирических правил изменения типов компонентных моделей, апробированные на практических задачах моделирования компонентов турбокомпрессорной установки.

Таким образом, предложенный метод анализа и композиционного гибридного моделирования ориентирован на особенности СТС рассматриваемого класса в условиях неполноты информации, разнокачественных данных о состоянии и функционировании СТС. Метод отличается от известных сочета-

нием возможностей аналитического, нейросетевого и нечеткого подходов к построению композиционных гибридных моделей СТС.

Он позволяет осуществлять адаптацию к изменениям системных и внешних факторов, повысить точность моделирования, а также типизировать представление нечетких ситуационных признаков для эффективного управления СТС.

Таблица 8 – Примеры правил изменения типов компонентных моделей

<i>Нейросетевая компонентная модель</i> → <i>Аналитическая компонентная модель с четкими параметрами</i>	<i>Аналитическая компонентная модель с четкими параметрами</i> → <i>Нейросетевая компонентная модель</i>
Идентификация 1-й ситуации мониторинга состояния компонентов СТС	Идентификация 2-й, 3-й и 4-й ситуаций мониторинга состояния компонентов СТС
Отсутствие необходимости параметрической настройки компонентной модели.	Возможность параметрической и структурно-параметрической настройки в фоновом режиме на основе постоянно накапливаемой актуальной информации (в виде обучающей выборки) о состоянии и функционировании компонентов СТС (в том числе о нештатных и аварийных ситуациях)
Возможность снизить объем и повысить скорость вычислений	
<i>Нечетко-логическая компонентная модель</i> → <i>Нечетко-нейросетевая компонентная модель</i>	<i>Нечетко-нейросетевая компонентная модель</i> → <i>Аналитическая компонентная модель с четкими параметрами</i>
Идентификация 2-й, 3-й и 4-й ситуаций мониторинга состояния компонентов СТС	Идентификация 1-й ситуации мониторинга состояния компонентов СТС
Возможность параметрической и структурно-параметрической настройки в фоновом режиме на основе постоянно накапливаемой актуальной неопределенной информации (в виде обучающей выборки, состоящих из нечетких примеров) о состоянии и функционировании компонентов СТС (в том числе о нештатных и аварийных ситуациях)	Отсутствие необходимости параметрической настройки компонентной модели
	Возможность снизить объем и повысить скорость нечетких вычислений

Метод нечеткого ситуационного управления СТС

Предлагаемый метод нечеткого ситуативного управления СТС позволяет учесть специфику композиционного моделирования и различных стратегий ситуативного управления этими системами в зависимости от складывающихся условий и предъявляемых требований, а также обеспечивает органичное объединение процессов композиционного моделирования и нечеткого ситуативного управления.

Этап 1. Построение нечеткой ситуативно-управляющей сети (НСУС):

$$FSCN = \langle P, S, R, U, D \rangle,$$

где $P = \{p_i \mid i = 1, \dots, I\}$ – множество нечетких ситуативных признаков, которыми описываются состояния СТС; $S = \{s_j \mid j = 1, \dots, J\}$ – множество нечетких ситуа-

ций; $R = \{r_{k_i}^{(p_i)} \mid k_i = 1, \dots, K_i, i = 1, \dots, I\}$ – множество нечетких управляющих решений; $U = \{u_{j_k, j_l} \mid s_{j_k}, s_{j_l} \in S\}$ – множество управляющих переходов между нечеткими ситуациями; $D = \{D_{s_{cur}, s_{tar}}\}$ – множество всех маршрутов НСУС, включающее в себя подмножества $D_{s_{cur}, s_{tar}} = \{d_b^{(s_{cur}, s_{tar})} \mid b = 1, \dots, B_{s_{cur}, s_{tar}}\}$, $s_{cur}, s_{tar} \in S$ маршрутов между различными текущими (идентифицированными) s_{cur} и целевыми s_{tar} нечеткими ситуациями НСУС.

Шаг 1. Задание нечетких ситуационных признаков $p_i, i = 1, \dots, I$ для описания нечетких ситуаций, описываемых переменными $\langle p_i, T_{p_i}, X_{p_i} \rangle$, где $T_{p_i} = \{T_m^{(p_i)} \mid m = 1, \dots, M\}$ – терм-множество переменной; X_{p_i} – базовое множество p_i . Для задания $T_m^{(p_i)}, m = 1, \dots, M$ используются нечеткие множества $T_m^{(p_i)} = \left\{ \left(\mu_{T_m^{(p_i)}}(x) / x \right) \right\}, x \in X_{p_i}$.

Шаг 2. Задание нечетких ситуаций в виде нечеткого множества 2-го уровня:

$$\forall s_j \in S : \tilde{s}_j = \left\{ \left(\mu_{\tilde{s}_j}(\tilde{p}_i) / P \right) \right\}, p_i \in P,$$

$$\tilde{p}_i = \left\{ \left(\mu_{\tilde{p}_i}(T_m^{(p_i)}) / T_m^{(p_i)} \right) \mid m = 1, \dots, M \right\}, i \in \{1, \dots, I\}.$$

Шаг 3. Задание управляющих решений.

$$r_{k_i}^{(p_i)} = \left\langle Tr_{k_i}^{(r_{k_i}^{(p_i)})}, Er_{k_i}^{(r_{k_i}^{(p_i)})}, Xr_{k_i}^{(r_{k_i}^{(p_i)})} \right\rangle, r_{k_i}^{(p_i)} \in R, k_i = 1, \dots, K_i, i = 1, \dots, I,$$

где $Tr_{k_i}^{(r_{k_i}^{(p_i)})}$ – терм-множество «направления» воздействия $r_{k_i}^{(p_i)}$ на признак p_i , например, $\{Tr_1^{(r_{k_i}^{(p_i)})} - \text{увеличить}, Tr_2^{(r_{k_i}^{(p_i)})} - \text{уменьшить}, Tr_3^{(r_{k_i}^{(p_i)})} - \text{не изменять}\}$; $Er_{k_i}^{(r_{k_i}^{(p_i)})}$ – терм-множество степени воздействия $r_{k_i}^{(p_i)}$ на признак p_i , например, $\{Er_1^{(r_{k_i}^{(p_i)})} - \text{очень слабо}, Er_2^{(r_{k_i}^{(p_i)})} - \text{слабо}, Er_3^{(r_{k_i}^{(p_i)})} - \text{сильно}, Er_4^{(r_{k_i}^{(p_i)})} - \text{очень сильно}\}$; $Xr_{k_i}^{(r_{k_i}^{(p_i)})}$ – шкала степени воздействия $r_{k_i}^{(p_i)}$ $[-1, 1]$.

Само же воздействие управляющего решения $r_{k_i}^{(p_i)}$ на признак p_i реализуется операцией нечеткой *max-min*-композиции между нечетким множеством $\tilde{p}_i$, и нечетким отношением $\tilde{r}_{k_i}^{(p_i)}$. В результате этого воздействия изменяется нечеткое значение признака p_i :

$$\tilde{p}_i' = \tilde{p}_i \bullet \tilde{r}_{k_i}^{(p_i)}.$$

Свойство *локальности управляющих решений* определяет число признаков, изменяемых в результате применения одного управляющего решения (управляющее решение *k-локально*, если оно приводит к изменению значений *k* признаков). Для нечеткого ситуативного управления СТС рассматриваемого класса целесообразным является декомпозиция *k-локальных* управляющих ре-

шений и представление их в виде последовательности 1-локальных управляющих решений, упорядоченных по степени воздействия на соответствующие признаки. Это позволяет:

- формировать и ранжировать упорядоченные совокупности 1-локальных управляющих решений, соответствующие k -локальному управляющему решению, с учетом задания пороговых значений воздействия управляющих решений на зависимые признаки;
- упростить построение и последующее использование НСУС для управления СТС;
- повысить гибкость адаптации НСУС при структурно-параметрической настройке композиционной гибридной модели СТС.

Для реализации указанных возможностей разработан способ оценки опосредованного воздействия управляющих решений на изменение зависимых нечетких ситуативных признаков, который основывается на оценке нечетких отношений влияния ситуационных признаков друг на друга. Способ состоит из рассмотренных ниже шагов 3.1–3.9.

Шаг 3.1. Для каждой пары признаков (для всех попарных сочетаний значений их терм-множеств) строится нечеткое отношение влияния. На рис. 5 показано нечеткое отношение влияния Ef_{p_i, p_z} признака p_i на признак p_z .

$$Ef_{p_i, p_z} =$$

	$T_1^{(p_z)}$	$T_2^{(p_z)}$	...	$T_M^{(p_z)}$
$T_1^{(p_i)}$	$Ef_{1,1}^{(p_i, p_z)}$	$Ef_{1,2}^{(p_i, p_z)}$	...	$Ef_{1,M}^{(p_i, p_z)}$
$T_2^{(p_i)}$	$Ef_{2,1}^{(p_i, p_z)}$	$Ef_{2,2}^{(p_i, p_z)}$	...	$Ef_{2,M}^{(p_i, p_z)}$
...	...	...	...	...
$T_M^{(p_i)}$	$Ef_{M,1}^{(p_i, p_z)}$	$Ef_{M,2}^{(p_i, p_z)}$	...	$Ef_{M,M}^{(p_i, p_z)}$

Рис. 5. Нечеткое отношение влияния признака p_i на признак p_z

Нечеткие отношения влияния являются направленными, и в общем случае $Ef_{p_i, p_z} \neq Ef_{p_z, p_i}$.

Шаг 3.2. Для всех построенных нечетких отношений влияния признаков друг на друга проводится проверка на транзитивность:

$$\forall p_i, p_z \in P:$$

$$Ef_{m_j, m_l}^{(p_i, p_z)} \geq \max_{m_k} \left(\min \left(Ef_{m_j, m_k}^{(p_i, p_z)}, Ef_{m_k, m_l}^{(p_i, p_z)} \right) \right), \forall m_j, m_k, m_l \in \{1, \dots, M\}.$$

Шаг 3.3. Если для нечетких отношений влияния признаков друг на друга свойство транзитивности нарушается, то для них выполняется транзитивное замыкание, например:

$$Ef_{p_i, p_z} = Ef_{p_i, p_z} \vee Ef_{p_i, p_z}^2 \vee \dots \vee Ef_{p_i, p_z}^I \vee \dots,$$

где $Ef_{p_i, p_z}^k = Ef_{p_i, p_z}^{k-1} \bullet Ef_{p_i, p_z}$.

Если же не удастся обеспечить транзитивного замыкания для каких-либо нечетких отношений, то может потребоваться их уточнение экспертом.

Шаг 3.4. В итоге формируется обобщенная матрица согласованных нечетких отношений влияния всех ситуационных признаков друг на друга:

$$Ef = \begin{bmatrix} Ef_{p_1, p_1} & Ef_{p_1, p_2} & \dots & Ef_{p_1, p_I} \\ Ef_{p_2, p_1} & Ef_{p_2, p_2} & \dots & Ef_{p_2, p_I} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Ef_{p_I, p_1} & Ef_{p_I, p_2} & \dots & Ef_{p_I, p_I} \end{bmatrix}.$$

Шаг 3.5. Допустим, что в результате применения управляющего решения $r_{k_i}^{(p_i)}$ значение признака p_i , представленного нечетким множеством $\tilde{p}_i = \left\{ \left(\mu_{\tilde{p}_i} (T_m^{(p_i)}) / T_m^{(p_i)} \right) \mid m = 1, \dots, M \right\}$, изменилось следующим образом: $\tilde{p}_i' = \left\{ \left(\mu_{\tilde{p}_i'} (T_m^{(p_i)}) / T_m^{(p_i)} \right) \mid m = 1, \dots, M \right\}$.

Шаг 3.6. Результирующее изменение признака p_i представляется в виде двух нечетких множеств для отдельного учета положительных и отрицательных воздействий:

- $\delta p_i^+ = \left\{ \left(\mu_{\delta p_i^+} (T_m^{(p_i)}) / T_m^{(p_i)} \right) \mid m = 1, \dots, M \right\}, i \in \{1, \dots, I\}$ – для учета положительных изменений значений признака p_i ;
- $\delta p_i^- = \left\{ \left(\mu_{\delta p_i^-} (T_m^{(p_i)}) / T_m^{(p_i)} \right) \mid m = 1, \dots, M \right\}, i \in \{1, \dots, I\}$ – для учета отрицательных изменений значений признака p_i .

Шаг 3.7. Определяются нечеткие множества δp_z^+ и δp_z^- , задающие положительные и отрицательные изменения признака p_z с учетом его взаимозависимости с признаком p_i :

$$\delta p_z^+ = \delta p_i^+ \bullet Ef_{p_i, p_z} = \left\{ \left(\mu_{\delta p_z^+} (T_m^{(p_z)}) / T_m^{(p_z)} \right) \mid m = 1, \dots, M \right\}, i \in \{1, \dots, I\},$$

$$\delta p_z^- = \delta p_i^- \bullet Ef_{p_i, p_z} = \left\{ \left(\mu_{\delta p_z^-} (T_m^{(p_z)}) / T_m^{(p_z)} \right) \mid m = 1, \dots, M \right\}, i \in \{1, \dots, I\}.$$

Шаг 3.8. Определяется опосредованное воздействие на признак p_z управляющего решения $r_{k_i}^{(p_i)}$, непосредственно воздействующего на признак p_i :

$$\forall p_z \in P:$$

$$\tilde{p}_z' = \left\{ \left(\min \left(1, \max \left(0, \left(\mu_{\tilde{p}_z} (T_m^{(p_z)}) + \mu_{\delta p_z^+} (T_m^{(p_z)}) - \mu_{\delta p_z^-} (T_m^{(p_z)}) \right) \right) \right) / T_m^{(p_z)} \right) \mid m = 1, \dots, M \right\}.$$

Аналогично учитывается опосредованное воздействие управляющего решения $r_{k_i}^{(p_i)}$ и на все другие нечеткие ситуационные признаки из P .

Шаг 3.9. Формирование и ранжирование совокупности 1-локальных управляющих решений, соответствующих k -локальному управляющему решению. В результате применения предложенной выше процедуры для каждого управляющего решения из R формируется совокупность 1-локальных управляющих решений, упорядоченных по степени их влияния на зависимые нечеткие ситуационные признаки. Причем, число этих 1-локальных управляющих решений может быть ограничено в зависимости от устанавливаемых пороговых значений воздействий управляющих решений на зависимые признаки.

Результаты оценки степени воздействия управляющих решений на нечеткие ситуативные признаки являются основой для задания управляющих переходов при реализации так называемого прямого подхода к построению НСУС для управления СТС.

Этап 2. Идентификация текущей нечеткой ситуации СТС, заключающаяся:

- *во-первых*, в сопоставлении значений признаков текущей ситуации со значениями признаков всех эталонных нечетких ситуаций построенной НСУС;
- *во-вторых*, в определении эталонной нечеткой ситуации НСУС, наиболее близкой в определенном смысле к текущей ситуации S_{cur} СТС в соответствии с выбранным способом их сопоставления;
- *в-третьих*, в отождествлении текущей нечеткой ситуации с найденной наиболее близкой эталонной ситуацией НСУС.

Одним из основных требований к выбираемому способу сопоставления нечетких ситуаций является возможность установления степени их близости (сходства). Этому требованию удовлетворяет, например, показатель *нечеткого равенства ситуаций*, хорошо зарекомендовавший себя для сопоставления нечетких множеств 2-го уровня [10]:

$$\theta(s_{cur}, s_j) = \bigwedge_{p_i \in P} \theta(\mu_{\tilde{s}_{cur}}(\tilde{p}_i), \mu_{\tilde{s}_j}(\tilde{p}_i)),$$

где

$$\theta(\mu_{\tilde{s}_{cur}}(\tilde{p}_i), \mu_{\tilde{s}_j}(\tilde{p}_i)) = \bigwedge_{T_m^{(p_i)}} \theta\left(\left(\mu_{\tilde{s}_{cur}}(p_i) / T_m^{(p_i)}\right), \left(\mu_{\tilde{s}_j}(p_i) / T_m^{(p_i)}\right)\right),$$

$$\theta\left(\left(\mu_{\tilde{s}_{cur}}(p_i) / T_m^{(p_i)}\right), \left(\mu_{\tilde{s}_j}(p_i) / T_m^{(p_i)}\right)\right) =$$

$$\begin{cases} \min \left[\begin{aligned} &\left(\max(1 - (\mu_{\tilde{s}_{cur}}(p_i) / T_m^{(p_i)}), (\mu_{\tilde{s}_j}(p_i) / T_m^{(p_i)})) \right), \\ &\left(\max(1 - (\mu_{\tilde{s}_j}(p_i) / T_m^{(p_i)}), (\mu_{\tilde{s}_{cur}}(p_i) / T_m^{(p_i)})) \right) \end{aligned} \right], \\ \text{если} \left[\begin{aligned} &\left(\mu_{\tilde{s}_{cur}}(p_i) / T_m^{(p_i)} \right) \notin (1 - \sigma, \sigma) \text{ И} \\ &\text{И} \left(\mu_{\tilde{s}_j}(p_i) / T_m^{(p_i)} \right) \notin (1 - \sigma, \sigma) \end{aligned} \right]; \\ 1, \text{ если } \left(\mu_{\tilde{s}_{cur}}(p_i) / T_m^{(p_i)} \right) \in (1 - \sigma, \sigma) \text{ ИЛИ } \left(\mu_{\tilde{s}_j}(p_i) / T_m^{(p_i)} \right) \in (1 - \sigma, \sigma), \end{cases}$$

σ – порог нечеткого равенства ситуаций, например, равный 0,8.

В качестве других операций для сопоставления признаков нечетких ситуаций могут использоваться, например, операции *дизъюнктивной*, *несвязной суммы* нечетких множеств либо операции вычисления *псевдорасстояний* (евклидово, хеммингово и другие) между нечеткими множествами с последующим агрегированием результатов этих сопоставлений для сравнения нечетких ситуаций в целом [16-18].

Сопоставление нечетких ситуаций может осуществляться на основе одного из следующих подходов [19]:

- сведение многокритериальной задачи оценки к однокритериальной на основе агрегирования результатов сопоставления отдельных признаков с использованием различных сверток (аддитивной, мультипликативной, максиминной, минимаксной и др.);
- по отдельному или нескольким приоритетным признакам, при этом остальные признаки рассматриваются в качестве дополнительных, результаты сопоставления которых удовлетворяют установленным ограничениям.

Важно задать нечеткие ситуации и определить степень нечеткого равенства ситуаций таким образом, чтобы при каждом их сопоставлении существовала одна ситуация с превышением порогового значения нечеткого равенства. В этом случае нечеткая ситуационная сеть считается хорошо определенной. Если таких ситуаций будет несколько, то эти ситуации необходимо объединить в одну. Если ситуаций, превышающих пороговое значение, нет, то сеть не до конца определена и требуется обратиться к экспертам для уточнения информации о СТС и НСУС.

Этап 3. Определение целевой ситуации, задание стратегии, поиск маршрутов в НСУС.

Определение целевой ситуации существенным образом влияет на поиск наилучшего маршрута в НСУС. При этом предвидеть ее достижимость из произвольной текущей ситуации не всегда представляется возможным. Это коллизия решается адаптацией НСУС в зависимости от выявленного типового случая ее адаптации (см. ниже) и тщательной проработкой маршрутов.

Стратегии ситуативного управления СТС представляют собой сформированные последовательности управляющих решений, воздействующих на нечеткие ситуативные признаки для перехода СТС из текущей в целевую ситуацию.

В качестве стратегий нечеткого ситуативного управления при различных условиях функционирования СТС для достижения целевой ситуации S_{tar} могут быть выбраны, например, следующие:

- минимизация числа применяемых управляющих решений (стратегия управления «*Качество*»);
- минимизация затратности применяемых управляющих решений (стратегия управления «*Экономия*»);
- максимальная надежность маршрута, т.е. минимизация рисков выхода из строя оборудования СТС (стратегия управления «*Безопасность*»);

- максимальный средний вес маршрута – отношение суммы весов управляющих переходов входящих в маршрут дуг к количеству этих дуг по одной выбранной стратегии (стратегия управления «Сбалансированная»);
- смешанные стратегии.

Ограничения, накладываемые на выбор маршрута, служат требованиями к промежуточным ситуациям, а именно, к составу и значениям признаков нечетких ситуаций.

Для обеспечения возможности выбора соответствующей стратегии нечеткого ситуативного управления выполняется предварительная оценка (взвешивание) каждого управляющего решения относительно критериев соответствующих стратегий.

На рис. 6 приведен фрагмент НСУС для управления энергоэффективностью промежуточного охладителя воздушной центробежной компрессорной установки. Здесь k_i^B – веса управляющих решений для стратегии управления «Безопасность», $k_i^Э$ – веса управляющих решений для стратегии управления «Экономия», k_i^K – веса управляющих решений для стратегии управления «Качество».

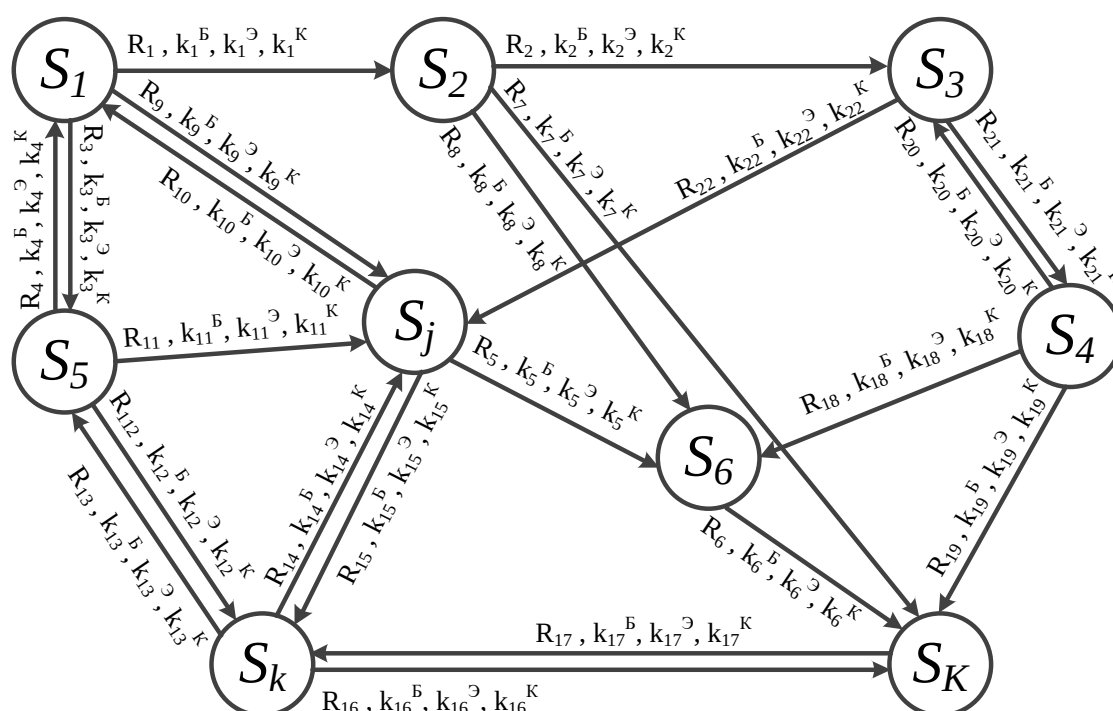


Рис. 6. Фрагмент нечеткой ситуационной сети для управления энергоэффективностью промежуточного охладителя воздуха центробежной компрессорной установки

В таблице 9 представлены примеры управляющих решений и их весовые коэффициенты относительно критериев соответствующей стратегии управления.

Таблица 9 – Управляющие решения и их веса решений
для различных стратегий управления СТС

Исходная ситуация	Конечная ситуация	Управляющее решение	Управляемый признак	Направление воздействия управляющего решения	Степень воздействия управляющего решения	Вес управляющего решения для стратегии «Безопасность»	Вес управляющего решения для стратегии «Экономия»	Вес управляющего решения для стратегии «Качество»
...	...	...	...	...	...	...	...	...
S_k	S_5	R_{13}	p_2	Не изменять	Слабо	0,9	0,1	0,2
S_k	S_j	R_{14}	p_2	Не изменять	Средне	0,8	0,2	0,3
...	...	...	...	...	...	...	...	...
S_4	S_3	R_{21}	p_1	Уменьшить	Слабо	0,8	0,7	0,5
S_4	S_6	R_{18}	p_1	Уменьшить	Средне	0,5	0,5	0,7
S_4	S_K	R_{19}	p_1	Уменьшить	Сильно	0,2	0,3	0,4
...	...	...	...	...	...	...	...	...
S_2	S_3	R_c	p_m	Увеличить	Слабо	0,4	0,5	0,8
...	...	...	...	...	...	...	...	...
S_2	S_K	R_c	p_m	Увеличить	Сильно	0,1	0,9	0,6

Для достижения целевой ситуации S_{tar} из текущей S_{cur} и могут быть задействованы разные маршруты (в результате выполнения соответствующих последовательностей управляющих решений), выбор которых зависит от задаваемой стратегии нечеткого ситуативного управления СТС.

Между текущей (идентифицированной) S_{cur} и целевой S_{tar} нечеткими ситуациями НСУС возможны различные маршруты:

$$\forall s_{cur}, s_{tar} \in S, s_{cur} \xrightarrow{D_{s_{cur}, s_{tar}} \subset D} s_{tar} : D_{s_{cur}, s_{tar}} = \{d_b^{(s_{cur}, s_{tar})} \mid b = 1, \dots, B_{s_{cur}, s_{tar}}\},$$

где $B_{s_{cur}, s_{tar}}$ – число возможных маршрутов между ситуациями S_{cur} и S_{tar} .

Выбор того или иного маршрута осуществляется в зависимости от заданной стратегии и реализуется в виде выполнения соответствующей последовательности управляющих решений, переводящих СТС через возможные управляющие переходы и промежуточные ситуации из S_{cur} в S_{tar} . Так, после идентификации текущей ситуации S_{cur} воздействие заданного управляющего решения $r_{k_i}^{(p_i)} \in R$ на S_{cur} сводится к нечеткой композиции нечеткого множества $\tilde{s}_{cur}$ и нечеткого отношения $\tilde{r}_{k_i}^{(p_i)}$. Затем полученное нечеткое множество $\tilde{s}_{mid}$ (определяющее некоторую промежуточную ситуацию S_{mid}) сопоставляется с нечетким множеством $\tilde{s}_{fin}$ (определяющим нечеткую ситуацию S_{fin}). При превышении заданной степени сходства делается вывод о переходе СТС из ситуации S_{cur} в ситуацию S_{fin} :

$$\tilde{s}_{mid} = \tilde{s}_{cur} \bullet r_{k_i}^{(p_i)}, \quad \tilde{s}_{fin} \approx \tilde{s}_{mid}.$$

После этого может быть выполнено присвоение показателям текущей ситуации СТС эталонных значений показателей ситуации s_{fin} .

Непосредственный поиск и выбор маршрутов в НСУС с учетом выбранной стратегии может осуществляться как переборным методом, так и на основе известных поисковых алгоритмов в ориентированных взвешенных графах, например, Форда, Мура, Беллмана и Флойда.

Этап 4. Адаптация НСУС к изменениям композиционной гибридной модели СТС.

Адаптация НСУС необходима, если происходят изменения в композиционной гибридной модели по результатам мониторинга состояния компонентов СТС и системы в целом. В таблице 10 описаны типовые случаи адаптации НСУС.

Таблица 10 – Типовые случаи адаптации НСУС

Случай адаптации НСУС	Характеристика
Случай 1. Изменение совокупности нечетких ситуативных признаков	Заново задаются нечеткие ситуации, управляющие решения, управляющие переходы, структура НСУС, маршруты
Случай 2. Непосредственное изменение состава нечетких ситуаций	Задаются дополнительные управляющие переходы, дополняется структура НСУС, изменяются маршруты
Случай 3. Изменение состава управляющих решений	Задаются дополнительные управляющие переходы, дополняется структура НСУС, изменяются маршруты

Оценка эффективности нечеткого ситуационного управления СТС

Эффективность использования предложенного метода нечеткого ситуационного управления центробежными компрессорами оценивалась с помощью экспериментального стенда ЭЦК-55 (экспериментальный центробежный компрессор, мощность электропривода 55 кВт), рис. 7 и рис. 8.



Рис. 7. Внешний вид экспериментального стенда ЭЦК-55

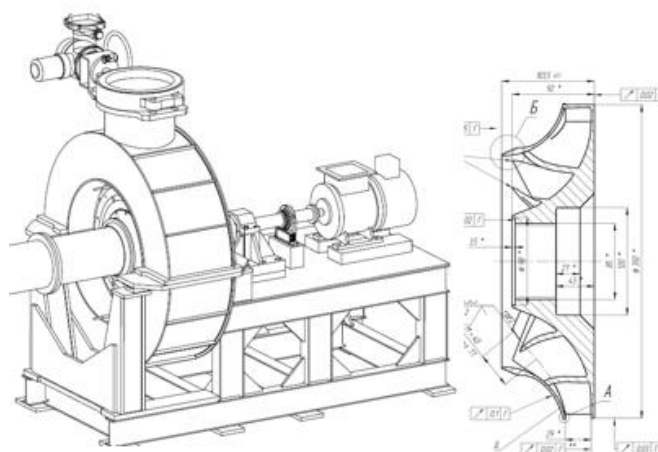


Рис. 8. Схема стенда ЭЦК-55

Стенд ЭЦК-55 с высокочастотным электродвигателем предназначен для проведения разгонных и газодинамических испытаний центробежных модельных компрессорных ступеней, определения их газодинамических характеристик КПД, отношения давлений, коэффициента внутреннего напора. Этот стенд выполнен со сменными проточными частями, что позволяет проводить эксперименты с различными конструкциями ступеней центробежного компрессора. К достоинствам этого стенда следует отнести возможность оперативной замены обученных компонентных моделей различных конструкций сменных проточных частей в ходе мониторинга их состояния.

По результатам исследований в качестве признаков для нечеткого ситуативного управления центробежного компрессора выделены следующие: p_1 – давление сжатого газа после компрессора; p_2 – температура сжатого газа после компрессора; p_3 – расход сжатого газа; p_4 – p_6 – температура, давление и влажность газа после охладителей и осушителей перед выдачей потребителю, соответственно. В таблице 11 приведены примеры описания нечетких ситуаций НСУС для нечеткого ситуативного управления компрессорной установкой.

Таблица 11 – Примеры описания нечетких ситуаций НСУС
для нечеткого ситуативного управления компрессорной установкой

Ситуация	Нечеткие ситуативные признаки					
	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6
...	...	...	...	...	...	...
S_8	{0,2; 1,0; 0,2} норма	{0,2; 8,0; 0,4} норма	{0,2; 1,0; 0,2} норма	{0,4; 1,0; 0,2} норма	{0,0; 8,0; 0,2} выше	{0,2; 1,0; 0,0} норма
S_6	{0,8; 0,4; 0,2} ниже	{0,8; 0,2; 0,2} ниже	{0,8; 0,4; 0,2} ниже	{1,0; 0,4; 0,2} ниже	{0,2; 1,0; 0,2} норма	{0,2; 1,0; 0,2} норма
S_{10}	{0,2; 1,0; 0,0} норма	{0,4; 1,0; 0,2} норма	{0,2; 1,0; 0,2} норма	{0,2; 1,0; 0,2} норма	{0,2; 1,0; 0,2} норма	{0,2; 1,0; 0,2} норма
S_{11}	{0,2; 1,0; 0,2} норма	{0,0; 1,0; 0,2} норма	{0,2; 1,0; 0,4} норма	{0,8; 0,4; 0,2} ниже	{0,4; 0,8; 0,2} норма	{0,2; 1,0; 0,4} норма
S_9	{0,2; 0,4; 0,8} выше	{0,0; 0,4; 0,1} выше	{0,0; 0,2; 0,8} выше	{0,0; 0,2; 1,0} выше	{0,2; 0,4; 0,1} выше	{0,2; 0,2; 0,8} норма
...	...	...	...	...	...	...

На рис. 9 для иллюстрации нечеткого ситуативного управления компрессорной установкой представлен фрагмент построенной НСУС.

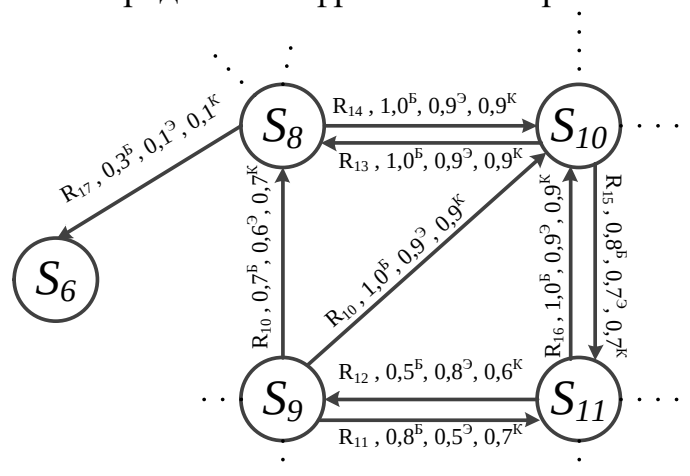


Рис. 9. Фрагмент НСУС для нечеткого ситуативного управления компрессорной установкой

Пример. Допустим, компрессорная установка (по результатам композиционного моделирования) находится в некоторой ситуации s_k . При этом температура охлажденного газа, идущего к потребителю становится выше нормы – ситуация s_8 . Снизить температуру охлажденного сжатого газа можно несколькими способами. Если снизить давление сжимаемого газа (уменьшив число оборотов компрессор), то его температура также будет ниже и соответственно температура охлажденного газа придет к норме – ситуация s_6 . Но управляющее решение «снизить число оборотов» и переход между ситуациями s_8 и s_6 характеризуется небольшими значениями весовых коэффициентов по всем стратегиям управления. Ситуация s_6 находится еще дальше от целевой ситуации, чем ситуация s_8 . Наилучшим решением для снижения температуры охлажденного сжатого газа будет увеличение циркуляции в теплообменнике, где охлаждается сжатый газ, с помощью насоса для охлаждающей жидкости – в таком случае СТС окажется в ситуации s_{10} . Также делается отметка, что возникли изменения в ходе работы теплообменников: ремонтной бригаде при следующем обходе необходимо осмотреть и, при необходимости, почистить теплообменники от возможных возникших отложений. Так как давление на выходе из компрессора не изменялось, а охлаждение газа увеличилось – как следствие может несколько снизиться давление охлажденного газа, и СТС окажется в ситуации s_{11} . Но потребителю необходим сжатый газ строго определенного давления и температуры, поэтому необходимо поднять давление с помощью регулировки числа оборотов компрессора (лучшее сочетание коэффициентов по стратегиям «Безопасность», «Качество» и «Экономия»), чтобы оказаться в целевой (для стратегии «Качество») ситуации s_{10} . Если принять управляющее решение «увеличить число оборотов средне или высоко», то для возвращения в целевую ситуацию придется снова снижать температуру, но такие скачки давления плохо действуют на работу СТС, и поэтому коэффициенты по стратегиям для этого перехода ниже, чем для наилучшего, ведущего к целевой ситуации. Так, путем нескольких управляющих решений и переходов между ситуациями, из произвольной ситуации СТС переходит в целевую ситуацию.

Исследовано 38 различных вариантов геометрии проточной части стенда, испытания проводились при нескольких значениях числа Маха (M_u). Всего произведены замеры 75 экспериментов, каждый включал 5-6 измерений при различных значениях условного коэффициента расхода Φ . Целевыми параметрами являлись характеристики коэффициента напора ψ (PSI на графиках) и КПД η (KPD на графиках) (рис. 10).

На рис. 10 использованы следующие обозначения: PSI, KPD – экспериментальные данные (управление осуществлялось оператором без использования предложенного метода), PSI CS, KPD CS – данные, полученные в результате использования метода нечеткого ситуативного управления (control system). Учитывались следующие стратегии нечеткого ситуативного управления: «Безопасность» (В), «Качество» (К), «Экономия» (Е), «Безопасность–Качество» (В–К), «Безопасность–Экономия» (В–Е).

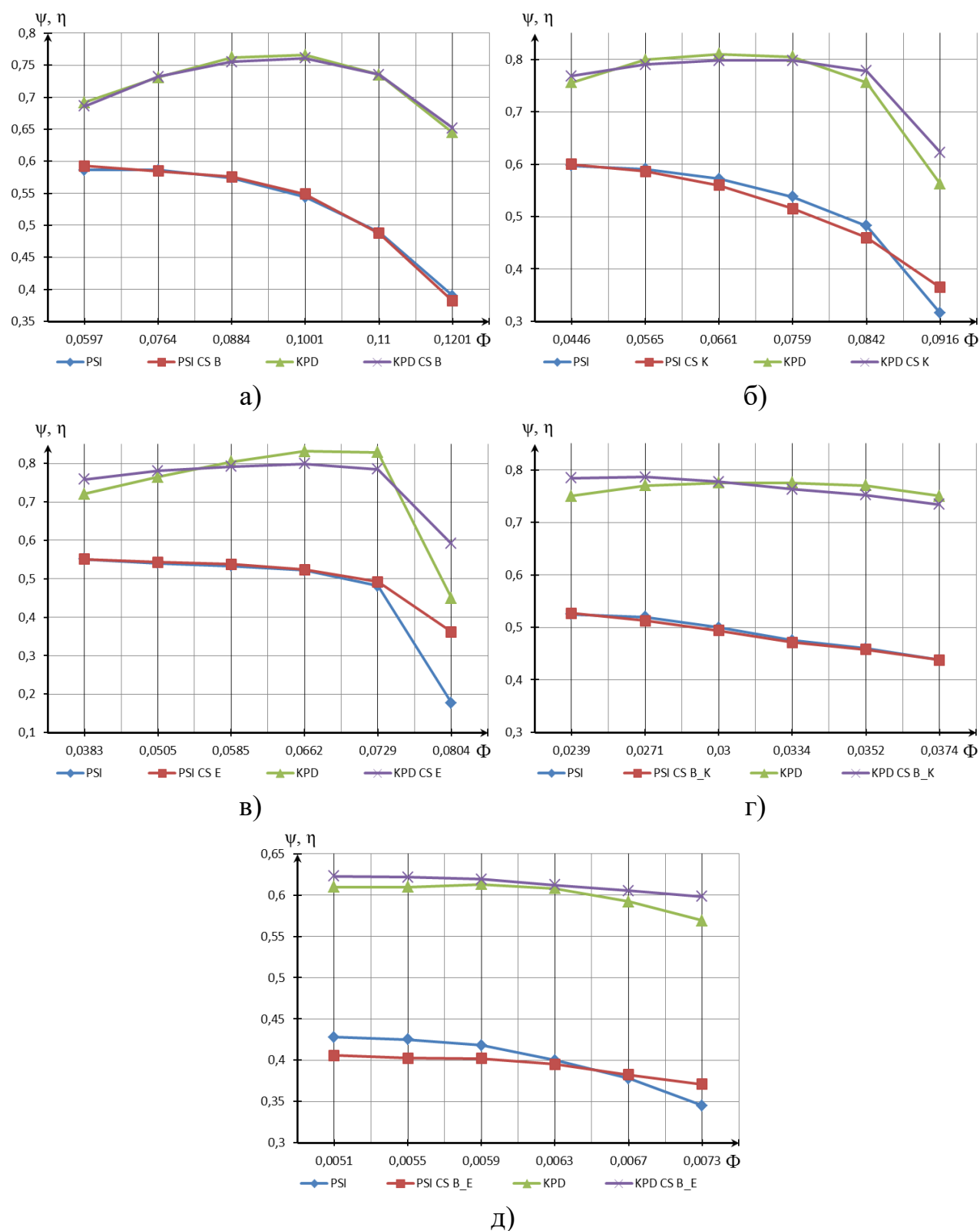


Рис. 10. Изменение характеристик коэффициента напора ψ и КПД η установки при изменении условного коэффициента расхода Φ ,
а) ступень 2015, $M_u = 0,79$; б) ступень 2001, $M_u = 0,917$;
в) ступень 2020, $M_u = 0,794$; г) ступень 3001, $M_u = 0,327$;
д) ступень 3012, $M_u = 0,589$

В таблице 12 представлены результаты сравнительной оценки эффективности управления компрессорной установкой оператором без и с использованием предложенного метода нечеткого ситуационного управления для различных стратегий.

Таблица 12 – Результаты сравнительной оценки эффективности управления компрессорной установкой

Показатели эффективности	Оператор	Стратегии нечеткого ситуационного управления				
		В	Е	К	В–К	В–Е
Коэффициент напора	0,46	0,47	0,49	0,51	0,49	0,45
КПД	0,75	0,74	0,76	0,78	0,76	0,77

Полученные результаты позволяют сделать выводы, что наибольшее повышение эффективности при использовании предложенного метода нечеткого ситуационного управления обеспечивается в случае реализации стратегии минимизации числа применяемых управляющих решений (стратегия управления «Качество»).

Также, использование предложенного метода нечеткого ситуационного управления позволяет повысить эффективность управления компрессорной установки: при реализации стратегии минимизации затратности применяемых управляющих решений (стратегия управления «Экономия»); а также для смешенной стратегии максимизации надежности маршрута и минимизации числа применяемых управляющих решений (смешенная стратегия управления «Безопасность–Качество»).

При этом погрешность полученных оценок (по методу Бутстрэп – *Bootstrap Techniques*) для КПД составила 3,21% (95% ДИ: 0,01–6,4), для коэффициента напора 2,51% (95% ДИ: 0,005–5,015).

Заключение

В статье описан метод анализа и композиционного гибридного моделирования СТС, включающий в себя: сбор и обобщение информации о СТС; выделение компонентов СТС и выявление их значимых показателей; создание логической модели СТС; обоснование и выбор компонентных моделей для построения композиционной гибридной модели СТС; построение компонентных моделей различных типов для описания всех компонентов СТС и оценку достоверности моделирования компонентов СТС с использованием построенных компонентных моделей; формирование структуры композиционной гибридной модели СТС на основе объединения построенных компонентных моделей и структурно-параметрическую настройку взаимосвязей между компонентными моделями в композиционной гибридной модели СТС; мониторинг состояния компонентов СТС, структурно-параметрическую настройку и изменение типов компонентных моделей. Предложенный метод ориентирован на особенности СТС рассматриваемого класса в условиях неполноты информации, разнокачественных данных о состоянии и функционировании СТС, отличается от известных

сочетанием возможностей аналитического, нейросетевого и нечеткого подходов к построению композиционных гибридных моделей СТС, позволяет осуществлять адаптацию к изменениям системных и внешних факторов, повысить точность моделирования, а также типизировать представление нечетких ситуационных признаков для эффективного управления СТС.

Рассмотрен разработанный метод нечеткого ситуационного управления СТС, включающий в себя: построение НСУС; идентификацию текущей нечеткой ситуации СТС; определение целевой ситуации, задание стратегии, поиск маршрутов для достижения целевой ситуации в зависимости от заданной стратегии; адаптацию НСУС к изменениям композиционной гибридной модели СТС. Созданный метод обеспечивает повышение эффективности управления СТС с учетом специфики композиционного моделирования и различных стратегий нечеткого ситуационного управления этими системами в зависимости от складывающихся условий и предъявляемых требований, а также обеспечивает органичное объединение процессов композиционного моделирования и нечеткого ситуационного управления.

Эффективность использования предложенных методов оценена на примере анализа, композиционного моделирования и нечеткого ситуационного управления компрессорными установками, и заключается в снижении энергозатрат, в повышении их ресурса за счет более устойчивых режимов работы и предотвращения помпажа, в расширении области рабочих характеристик компрессора и сужения зон запаса на регулирование.

Работа выполнена в рамках государственного задания № FSWF-2020-0019, а также при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-29-03088).

Литература

1. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
2. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
3. Алтунин А. А. Теоретическое и практическое применение методов принятия решений в условиях неопределенности. Том 1. Общие принципы принятия решений в условиях различных видов неопределенности. М.: Издательские решения, 2019. 484 с.
4. Тарасик В. П. Математическое моделирование технических систем. Мн.: ДизайнПРО, 2004. 640 с.
5. Борисов В. В., Мисник А. Е. Комбинированный нейросетевой способ моделирования для оперативного управления сложными системами // Информационные технологии. 2012. № 7. С. 69-72.
6. Поспелов Д. А. Большие системы. Ситуационное управление. М.: Знание, 1975. 64 с.
7. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. 288 с.

8. Федунов Б. Е. Механизмы вывода в базе знаний бортовых оперативно советующих экспертных систем // Известия РАН. Теория и системы управления. 2002. № 4. С. 42-52.
9. McCarthy J. Actions and other events in situation calculus // In Proc. of Proceedings of the Eighth International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR-2002), 2002. P. 615-628.
10. Мелихов А. Н., Берштейн Л. С, Коровин С. Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990. 271 с.
11. 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.
12. Борисов В. В., Федулов А. С., Зернов М. М. Основы гибридизации нечетких моделей. Серия «Основы нечеткой математики». Книга 9. М.: Горячая линия–Телеком, 2017. 100 с.
13. Denisenkov M. A., Borisov V. V. Modeling the behavior of intelligent agents based on adaptive fuzzy situational networks // Proc. 3th Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Application (RPC). Vladivostok, Russia, 18-25 Aug. 2018. P. 1-5. DOI: 10.1109/RPC.2018.8482217.
14. Ющенко А. С. Состояние и перспективы коллаборативной робототехники // Экстремальная робототехника. 2018. Т. 1. № 1. С. 107-113.
15. Борисов В. В., Зернов М. М. Определение совокупности нечетких моделей для решения комплексной задачи поддержки принятия решений // Вестник Московского энергетического института. 2011. № 1. С. 74-85.
16. Борисов В. В., Федулов А. С., Зернов М. М. Основы теории нечетких множеств. Серия «Основы нечеткой математики». Книга 1. М.: Горячая линия–Телеком, 2014. 88 с.
17. Batyrshin I., Kosheleva O., Kreinovich V., Kubysheva N., Akhtiamov R. Contrast Similarity Measures of Fuzzy Sets // Computación y Sistemas. 2019. Vol. 23. No. 4. P. 1569-1573. DOI: 10.13053/CyS-23-4-3325.
18. Batyrshin I. Towards a general theory of similarity and association measures: Similarity, dissimilarity and correlation functions // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. 2019. Vol. 36. No. 4. P. 2977-3004. DOI: 10.3233/JIFS-181503.
19. Огнев И. В., Борисов В. В., Сутула Н. А. Ассоциативные память, среды, системы. М.: Горячая линия–Телеком, 2016. 420 с.

References

1. Buslenko N. P. *Modelirovanie slozhnyh sistem* [Modeling of complex systems]. Moscow, Nauka, 1978. 400 p. (in Russian).
2. Samarsky A. A., Mikhailov A. P. *Matematicheskoe modelirovanie. Idei. Metody. Primery* [Mathematical modeling. Ideas. Methods. Examples. 2nd ed.] Moscow, Fizmatlit, 2001. 320 p. (in Russian).
3. Altunin A. A. *Teoreticheskoe i prakticheskoe primeneniye metodov prinyatiya resheniy v usloviyakh neopredelennosti. Tom 1. Obshchie principy prinyatiya resheniy v usloviyakh razlichnykh vidov neopredelennosti* [Theoretical and practical application of decision-making methods in conditions of uncertainty. Volume 1. General

principles of decision-making in conditions of various types of uncertainty]. Izdatel'skie resheniya, 2019. 484 p. (in Russian).

4. Tarasik V. P. *Matematicheskoe modelirovanie tekhnicheskikh sistem* [Mathematical modeling of technical systems]. Minsk, DizajnPRO, 2004. 640 p. (in Russian).

5. Borisov V. V., Misnik A. E. Kombinirovannyj nejrosetevoj sposob modelirovaniya dlya operativnogo upravleniya slozhnymi sistemami [Combined neural network modeling method for operational management of complex systems]. *Information Technologies*, 2012, no. 7, pp. 69-72 (in Russian).

6. Pospelov D. A. *Bol'shie sistemy. Situacionnoe upravlenie* [Big systems. Situational management]. Moscow, Znanie, 1975. 64 p. (in Russian).

7. Pospelov D. A. *Situacionnoe upravlenie: teoriya i praktika* [Situational control: theory and practice]. Moscow, Nauka, 1986. 288 p. (in Russian).

8. Fedunov B. E. Mekhanizmy vyvoda v baze znaniy bortovyh operativno sovetuyushchih ekspertnyh sistem [Mechanisms of inference in the knowledge base of on-board operational consulting expert systems]. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2002, no. 4, pp. 42-52 (in Russian).

9. McCarthy J. Actions and other events in situation calculus. In *Proceedings of the Eighth International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR-2002)*, 2002, pp. 615-628.

10. Melikhov A. N., Berstein L. S., Korovin S. Ya. *Situacionnye sovetuyushchie sistemy s nechyotkoj logikoj* [Situational advising systems with fuzzy logic]. Moscow, Nauka, 1990. 271 p. (in Russian).

11. Borisov V. V., Zernov M. M. Realizaciya situacionnogo podhoda na osnove ierarhicheskoy situacionno-sobytiynoj seti [Implementation of the situational approach based on the hierarchical situational-event network]. *Artificial Intelligence and Decision Making*, 2009, no. 1, pp. 17-30 (in Russian).

12. Borisov V. V., Fedulov A. S., Zernov M. M. *Osnovy gibridizacii nechyotkih modelej. Seriya "Osnovy nechyotkoj matematiki". Kniga 9* [Fundamentals of hybridization of fuzzy models. Series "Fundamentals of Fuzzy Mathematics". Book 9]. Moscow, Goryachaya Liniya–Telekom, 2017. 100 p. (in Russian).

13. Denisenkov M. A., Borisov V. V. Modeling the behavior of intelligent agents based on adaptive fuzzy situational networks. *Proc. 3th Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Application (RPC)*. Vladivostok, Russia, 18-25 Aug. 2018, pp. 1-5. DOI: 10.1109/RPC.2018.8482217.

14. Yushchenko A. S. Sostoyanie i perspektivy kollaborativnoj robototekhniki [State and prospects of collaborative robotics]. *Extreme robotics*, 2018, vol. 1 (1), pp. 107-113 (in Russian).

15. Borisov V. V., Zernov M. M. Opredelenie sovokupnosti nechyotkih modelej dlya resheniya kompleksnoj zadachi podderzhki prinyatiya reshenij [Determination of the set of fuzzy models for solving the complex problem of decision support], *MPEI Vestnik*, 2011, no. 1, pp. 74-85 (in Russian).

16. Borisov V. V., Fedulov A. S., Zernov M. M. *Osnovy teorii nechyotkih mnozhestv. Seriya "Osnovy nechyotkoj matematiki". Kniga 9* [Fundamentals of the

theory of fuzzy sets. Series “Fundamentals of Fuzzy Mathematics”. Book 1]. Moscow, Goryachaya liniya–Telekom, 2014. 88 p. (in Russian).

17. Batyrshin I., Kosheleva O., Kreinovich V., Kubysheva N., Akhtiamov R. Contrast Similarity Measures of Fuzzy Sets. *Computación y Sistemas*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 1569-1573. DOI: 10.13053/CyS-23-4-3325.

18. Batyrshin I. Towards a general theory of similarity and association measures: Similarity, dissimilarity and correlation functions. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2019, no. 36, pp. 2977-3004. DOI: 10.3233/JIFS-181503.

19. Ognev I. V., Borisov V. V., Sutula N. A. *Associativnye pamyat', sredy, sistemy* [Associative memory, environments, systems]. Moscow, Goryachaya Liniya–Telekom, 2016. 420 p. (in Russian).

Статья поступила 29 мая 2021 г.

Информация об авторах

Борисов Вадим Владимирович – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры управления и интеллектуальных технологий. Национальный исследовательский университет «МЭИ». Старший научный сотрудник научно-исследовательского центра. Военная академия войсковой противовоздушной обороны Вооруженных сил Российской Федерации им. А.М. Василевского. Области научных интересов: нечеткий и нейро-нечеткий анализ, моделирование сложных систем и процессов; интеллектуальная поддержка принятия решений; ассоциативные системы хранения и обработки информации. E-mail: vbor67@mail.ru

Авраменко Дарья Юрьевна – аспирант кафедры вычислительной техники. Национальный исследовательский университет «МЭИ». Область научных интересов: нечеткий и нейро-нечеткий анализ, моделирование сложных систем и процессов. E-mail: leyzi.small@yandex.ru

Адрес: 214013, Россия, г. Смоленск, Энергетический проезд, д. 1.

Fuzzy situational control of complex systems based on their composite hybrid modeling

V. V. Borisov, D. Yu. Avramenko

Problem definition. We consider a class of complex technical systems (CTS) characterized by: multicomponentence, a large number of quantitative and qualitative parameters, non-linearity of interdependencies between them; incomplete information, the complexity of experimental studies, the risks of dangerous situations and the catastrophism of their consequences; the uniqueness of the modes and conditions of the CTS functioning. The features of such systems determine the specifics of their analysis and modeling: the impossibility of design and using general analytical models; the difficulty of ensuring the reliability of modeling due to the uniqueness, lack of data on dangerous and emergency modes of operation of the CTS. These features allow us to justify the feasibility of combining different approaches and methods for composing a single model of the system from the models of its individual components. In turn, the control features of such systems allow us to justify the feasibility of using a fuzzy situational approach, which allows us to take into account the specifics of composite modeling and various situational control strategies. **The aim of the work** is to develop and study methods: first, analysis and composite hybrid modeling of complex systems; second, the

method of fuzzy situational control of complex systems, which provides an increase in the efficiency depending on the management strategy, and also allows to organically combine the processes of composite modeling and fuzzy situational control. **Methods used:** system analysis, theory of artificial neural networks, fuzzy sets, relations and fuzzy inference, fuzzy situational networks, mathematical statistics. **Novelty:** A method of analysis and composite hybrid modeling of complex systems has been developed, combining the capabilities of analytical, neural network and fuzzy approaches, and allowing to increase the accuracy of modeling these systems. A method of fuzzy situational control of complex systems based on composite hybrid models is proposed, which consists in the use of a fuzzy situational-control network to identify current situations and translate the system into target situations. The method organically combines the processes of compositional modeling and fuzzy situational control. **Result:** The proposed methods are used to solve the problems of controlling compressor units. **Practical significance:** The use of the developed methods made it possible to increase the accuracy of the simulation, as well as the efficiency of the control of compressor units.

Keywords: composite hybrid modeling, complex system, fuzzy situational-control network, fuzzy situational control.

Information about Authors

Vadim Vladimirovich Borisov – Dr. habil. of Engineering Sciences, Professor. Professor of the Department of Management and Intelligent Technology. National Research University “Moscow Power Engineering Institute”. Researcher. Military Academy of Army Air Defence A.M. Vasilevsky. Fields of research: fuzzy and fuzzy neural models and networks, intellectual decision-making support, associative memory, associative systems of storage and processing of the information and knowledge. E-mail: vbor67@mail.ru

Daria Yuryevna Avramenko – graduate student of the Department of Computer Engineering. National Research University “Moscow Power Engineering Institute”. Fields of research: fuzzy and neuro-fuzzy analysis, modeling of complex systems and processes. E-mail: leyzi.small@yandex.ru

Address: Russia, 214013, Smolensk, Energeticheskiy proezd, 1.